

ABSTRAKT: Tato diplomová práce je zaměřena na studium vybraných vlastností slévárenských hořčíkových slitin. Jelikož tyto slitiny jsou z hlediska mechanických vlastností velmi perspektivní v automobilovém a leteckém průmyslu. Na zkušebních vzorcích nejpoužívanějších typů hořčíkových slitin (AZ91, AM60) v praxi, byly provedeny tahové zkoušky, termická analýza, diferenční termická analýza a následně prozkoumány lomové plochy.

KLÍČOVÁ SLOVA: Hořčíkové slitiny, tahová zkouška, termická a diferenční termická analýza.

ABSTRACT: This dissertation is focused on studies selected properties of cast magnesium alloys. These alloys are very perspective materials in automotive and aeronautical industry. On proving samples the most application types magnesium alloys in practice (AZ91, AM60), were made tensile tests, thermal analysis and differential thermal analysis and consequently were scanned details of fracture.

KEY WORDS: Magnesium alloys, tensile test, thermal and differential thermal analysis.

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

1. Úvod	5
2. Teoretická část	6
2.1. Historie hořčíku a hořčíkových slitin	6
2.2. Fyzikální a mechanické vlastnosti hořčíku	9
2.3. Slitiny hořčíku	10
2.3.1. Označování hořčíkových slitin	10
2.3.2. Prvky používané při výrobě slitin hořčíku	11
2.4. Slévárenské slitiny hořčíku	13
2.4.1. Použití hořčíkových slitin a jejich rozdělení	13
2.4.2. Přednosti odlitků z hořčíkových slitin	14
2.5. Typy hořčíkových slitin	15
2.5.1. Hořčíkové lité slitiny	15
2.5.2. Slitiny hořčíku pro tváření	22
2.6. Technologické vlastnosti slitin hořčíku	23
2.7. Degradací procesy v hořčíkových slitinách	25
2.8. Charakteristiky a typická použití konkrétních typů hořčíkových slitin	26
2.9. Technologie výroby odlitků z hořčíkových slitin	30
2.9.1. Tlakové lití	30
2.9.2. Odlévání do pískových forem	31
2.9.3. Speciální technologie odlévání	31
2.9.4. Tepelné zpracování hořčíkových slitin	34
3. Experimentální část	35
3.1. Tahová zkouška	35
3.1.1. Příprava zkušebních vzorků	35
3.1.2. Provedení tahových zkoušek	36
3.1.3. Příprava vzorků pro vyhodnocení lomových ploch	37
3.1.4. Vyhodnocení vzorků na elektronovém mikroskopu	37
3.1.5. Vyhodnocení výsledků	38
3.1.6. Zhodnocení lomových struktur	45
3.2. Termická analýza	45
3.2.1. Příprava termočlánků pro měření	46
3.2.2. Provedení termické analýzy	47
3.2.3. Vyhodnocení výsledků termické analýzy, grafické znázornění křivek ochlazování	49
3.2.4. Diskuse dosažených výsledků termické analýzy	53
3.2.5. Provedení metalografických zkoušek	54
3.2.6. Zhodnocení struktur	55
3.3. Diferenční termická analýza	58
3.3.1. Vyhodnocení výsledků diferenční termické analýzy	60
3.3.2. Diskuse dosažených výsledků diferenční termické analýzy	65
4. Závěr	66
5. Seznam použité literatury	67

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval Katedře slévárenství za poskytnutí zkušebních materiálů a experimentálního zařízení. Zvlášť bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Rudolfovi Kořenému za jeho velmi cenné rady a postřehy, a také panu Ing. Petru Lichému za jeho pomoc při zajištění a provedení všech uskutečněných experimentů a měření.

1. Úvod

Slitiny hořčíku jsou v současné době materiálovou skupinou s nejrychlejším nárůstem objemu výroby. Důvodem je především jejich nízká hustota (pouze 2/3 hustoty hliníku) kombinovaná s výbornými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, dobrými vlastnostmi slévárenskými, velmi dobrou obrobiteľností a dobrou možností recyklace. Jsou velmi užitečné v leteckém průmyslu, vojenském letectví, kosmickém průmyslu nebo tam, kde se součástky otáčejí velkou rychlostí a je třeba malou hmotností zmenšit setrvačnou sílu. Zároveň jsou dnes tyto slitiny využívány v předmětech domácí potřeby jako jsou šicí stroje, sportovní potřeby, ruční nástroje, v elektronickém a automobilovém průmyslu a v dopravě. Nejčastěji používanou slitinou je známá AZ91.

Úkolem této diplomové práce je studium vybraných vlastností slévárenských slitin hořčíku. Na zkušebních vzorcích byla provedena tahová zkouška za vyšších teplot. Následně byly vzorky podrobeny studiu morfologie lomových ploch. Provedena byla také termická a diferenční termická analýza v praxi nepoužívanějších druhů hořčíkových slitin.

2. Teoretická část

2.1. Historie hořčíku a hořčíkových slitin

Hořčík byl objeven v roce 1774 a pojmenován po dávném městě Magnesia. Hořčík je nejllehčím známým konstrukčním materiálem, nebereme-li v úvahu berylium, které je toxické. Je šestým nejrozšířenějším prvkem a tvoří asi 2% hmoty zemské kůry. Zdrojem hořčíku jsou také oceány a suchozemská slaná jezera, např. Mrtvé moře na hranici mezi Izraelem a Jordánskem nebo Velké solné jezero v Utahu v USA. Zásoby hořčíku jsou považovány za nevyčerpatelné.

Hořčík je sám o sobě velmi reaktivní, proto se vyskytuje pouze ve sloučeninách. Hlavními surovinami pro výrobu hořčíku jsou magnezit (MgCO_3), dolomit ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) a serpentín ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), karnalit ($\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$) a mořská voda. Kovový hořčík se vyrábí elektrolýzou roztaveného bezvodého chloridu hořečnatého MgCl_2 při teplotě asi 750°C a další rafinací nebo silikotermickou redukcí vypáleného dolomitu ferosiliciem při teplotě asi

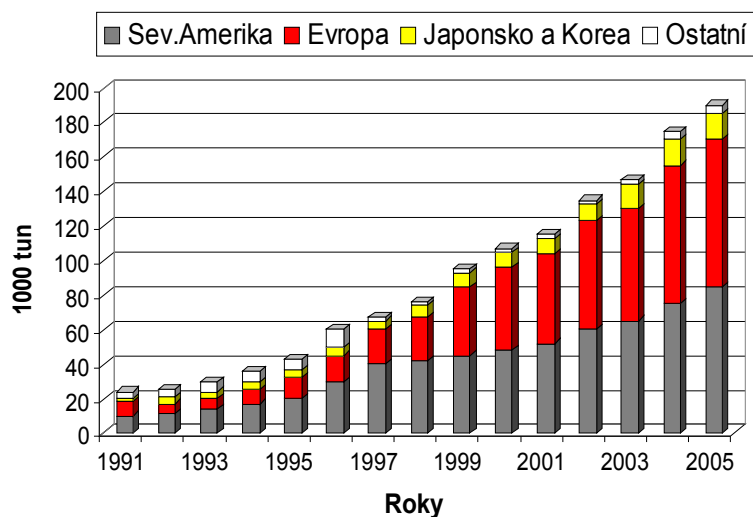
1200°C. Pyrometalurgickými způsoby výroby lze získat hořčík o čistotě 99,7%, elektrolytickými způsoby můžeme dosáhnout čistoty až 99,9%. Výroba hořčíku, ať už elektrochemickou nebo termickou redukcí, vyžaduje velký energetický vklad, sofistikovanou technologii a při výrobě je nutné čelit významným environmentálním a bezpečnostním rizikům.

Oproti jiným neželezným kovům se i při svém rozšíření v přírodě vyrábí jen ve 12 krajínách a jeho výroba je určitou charakteristikou technologické a ekonomické vyspělosti daného státu.

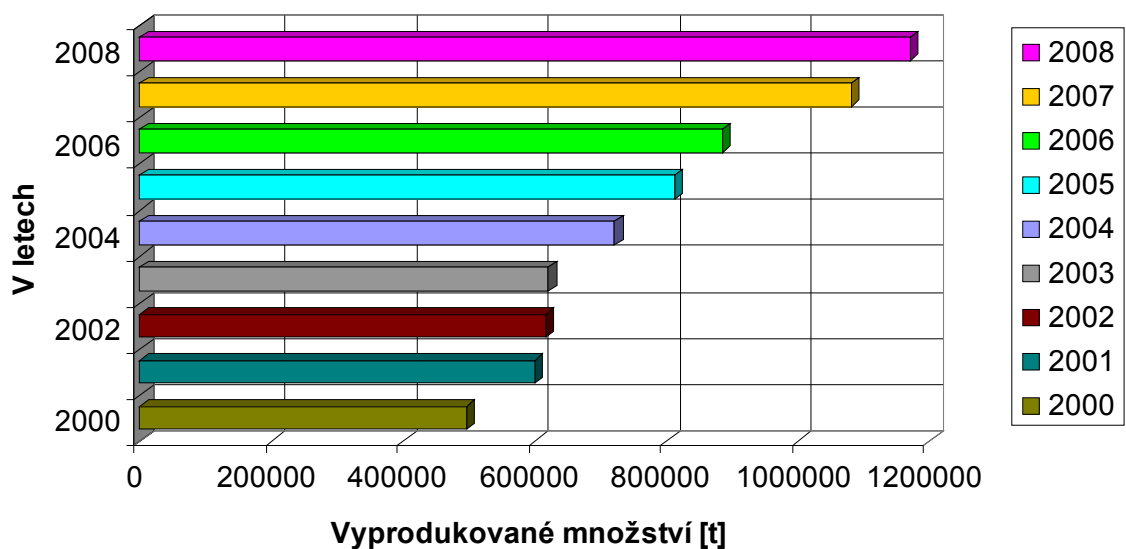
Podle statistik IMA (International Magnesium Association) připadlo v roce 2001 celých 39% primárního hořčíku na legování Al slitin, 38% bylo využito při výrobě Mg slitin, a to zejména pro přesné tlakové odlitky. Jen asi 10% z celkového množství bylo využito na protikorozi Mg anody, redukcí jiných kovů (Zr, Ti), Mg prášky pro chemikálie a legování slitin jiných neželezných kovů. Ovšem největším překvapením plynoucím z tohoto statistického průzkumu bylo pouhé 13% využití primárního hořčíku při výrobě surového železa [23].

Podle statistik a prognóz fy Hydro Magnesium vzrostla spotřeba hořčíkových slitin za desetiletí (1991 až 2001) zhruba desetkrát (obr. 1), požadavky na využití hořčíkových slitin narůstají parabolicky [7]. Předpokládá se, že tento nárůst spotřeby se udrží ještě přibližně deset let. Tento fakt potvrzují i statistické údaje mapující výrobu čistého hořčíku, jehož produkce rovněž citelně stoupá a za posledních osm let se více než zdvojnásobila (obr. 2). Světovým suverénem v tomto průmyslovém odvětví je zcela nepochybně Čína, jejíž produkce čistého hořčíku za rok 2008 čítala celých 80% z celkové světové produkce (tab. 1).

Jelikož hořčíkové slitiny nabízejí jako konstrukční materiál řadu výhod a charakteristických znaků, začaly se masivně prosazovat v automobilovém průmyslu, zpočátku zejména k výrobě interiérových prvků jako je např. středový panel, přístrojová deska, rámy sedaček, volant, konstrukce střešních oken atd. Novým trendem v oblasti používání Mg slitin v automobilovém průmyslu je ovšem snaha o zmenšení hmotnosti i ostatních částí automobilů, proto se začaly používat i na střešní panely, sklápěcí střechy, litá či tvářená kola, sestavy pro vnitřní potrubí, víka hlav válců, olejové vany, startéry, alternátory a dokonce i bloky motorů. Vzhledem k této skutečnosti je v současné době kladen velký důraz na vývoj této skupiny slitin ve smyslu odstranění jejich horší korozní odolnosti, která jakožto poslední brání plné expanzi hořčíkových slitin do automobilového a leteckého průmyslu [11].



Obr.1. Světová produkce odlitků z Mg slitin [5].



Obr.2. Vývoj světové produkce čistého Mg [5].

Tab.1. Světová produkce čistého Mg vyčíslená v tunách [5].

Stát	2000	2002	2004	2006	2007	2008
Brazílie	12.000	12.000	12.000	12.000	18.000	18.000
Čína	177.000	300.000	447.000	602.000	873.000	953.000
Francie	17.000	---	---	---	---	---
Indie	900	900	900	900	900	900
Izrael	27.500	27.500	27.500	27.500	27.500	27.500
Kanada	64.000	120.000	120.000	123.000	9.000	9.000
Kazachstán	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Norsko	35.000	42.000	---	---	---	---
Rusko	40.000	40.000	40.000	46.000	80.000	80.000
Srbsko a Černá Hora	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Ukrajina	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
USA	83.000	45.000	45.000	45.000	45.000	52.000
Celkem	497.000	617.000	722.000	886.000	1.080.000	1.170.000

2.2. Fyzikální a mechanické vlastnosti hořčíku

Hořčík krystalizuje v těsně hexagonální soustavě, proto jej není za normální teploty možno tvářet. Při mechanickém zatížení se deformuje dvojčatěním. Čistý hořčík a konvenčně lité slitiny hořčíku mají sklon ke vzniku křehkých interkrystalických lomů v rovinách dvojčatění

nebo v bazálních rovinách. Při teplotách nad 225°C vznikají nové bazální roviny a hořčík se stává dobře tvárným materiálem. V tabulce jsou uvedeny některé fyzikální vlastnosti čistého hořčíku.[2]

Tab.2. Fyzikální vlastnosti čistého hořčíku [13].

Atomová hmotnost	24,31
Hustota (při 20 °C)	1740 kg/m ³
Teplota tavení	650 °C
Teplota varu	1107 °C
Skupenské teplo tavení	372 kJ/kg
Měrná tepelná kapacita (při 20 °C)	1,03 kJ/kg.K
Tepelná vodivost (při 20 °C)	155 W/m.K
Lineární tepelná roztažnost (při 20 °C)	26.10 ⁻⁶ 1/K
Součinitel stahování při tuhnutí	4,2 %
Modul pružnosti	45 GPa

Tab.3. Mechanické vlastnosti hořčíku[1].

	Mez kluzu v tahu [MPa]	Maximální napětí [MPa]	Prodloužení [%]	Tvrдость	
				HRC	HB
Odlévaný Mg	21	90	2 - 6	13	30
Protlačovaný Mg	69 - 105	165 - 205	5 - 8	26	35
Válcované plechy	115 - 140	180 - 220	2 - 10	48-54	45-47
Žíhané plechy	90 - 105	160 - 195	3 - 15	37-39	40-41
Slitina AZ91	160	250	7	70	-
Slitina AZ91(PM)	270	330	4	-	-

2.3. Slitiny hořčíku

Slitiny hořčíku patří ke slitinám zvláště lehkým s výhodným poměrem mezi pevností a hustotou. Mají nízkou měrnou hmotnost a podobné mechanické vlastnosti jako slitiny hliníku. Jejich specifické mechanické vlastnosti jsou z tohoto pohledu výhodnější. Slitiny Mg jsou dobře slévateľné a mají nízkou teplotu tání, což zlepšuje některé další slévářenské vlastnosti. Při vhodné volbě legujících prvků se eliminuje výskyt slévářenských vad jako jsou mikrostaženiny nebo trhliny. Podle vžitých zvyklostí rozdělujeme slitiny hořčíku na slitiny slévářenské a slitiny pro tváření. Pro své vlastnosti mají možnost širokého uplatnění nejen v automobilovém a leteckém průmyslu. Jejich nevýhodou je však zatím relativně vysoká cena.

Tento nedostatek by se měl odstranit jednak programem recyklace, jednak jejich využíváním pro odlévání tvarově složitých tenkostěnných součástek.

2.3.1. Označování hořčíkových slitin.

Složení slitin se udává podle způsobu názvů hlavních prvků používaných pro hořčíkové slitiny. Jsou to především Al, Mn, Zn.[8]

Tab.4. Označení prvků v Mg slitinách dle ASTM[8]

Písmeno	Legující prvek
A	Hliník (Al)
C	Měď (Cu)
E	Kovy vzácných zemin (RE)
H	Thorium (Th)
K	Zirkonium (Zr)
L	Lithium (Li)
M	Mangan (Mn)
Q	Stříbro (Ag)
S	Křemík (Si)
W	Yttrium (Y)
Z	Zinek (Zn)
X	Vápník (Ca)
J	Stroncium (Sr)

Tak např. označení AZ91 značí, že slitina obsahuje 9 % Al a 1 % Zn. Upřesněním mohou být další písmena, např. AZ91 A, B, ...E (znamenají další informace o zpracování – H deformované, tepelné zpracování – T, atd.)

2.3.2. Prvky používané při výrobě slitin hořčíku

Při výběru legujícího prvku záleží na zamýšleném použití slitiny a na tom, které vlastnosti chceme zlepšit – pevnost, slévateľnost, odolnost proti creepu, odolnost proti korozi, zvýšený modul. Musíme si ovšem být vědomi faktu, že zlepšení jedné vlastnosti může zhoršit vlastnost jinou.

- **Hliník** – je nejčastěji užívaným legujícím prvkem v hořčíku a tvoří základ litých slitin. Slitiny, které mají více než 6 hm. % Al, mohou být tepelně zpracovávány.

Hliník zlepšuje pevnost a optimální poměr pevnosti a tažnosti u slitin se 6%. Slitiny jsou dobře slévateľné.

- **Křemík** – zvyšuje tekutost roztavených slitin. V přítomnosti železa snižuje odolnost proti korozi. Je používán jen v několika slitinách, např. AS21 resp. AS41.
- **Lithium** – je jediným legujícím prvkem, který snižuje hustotu pod hodnotu čistého hořčíku. Je rozpustné při pokojové teplotě až do 5,5 hm. %. Přidání Li snižuje pevnost, ale na druhé straně zvyšuje tažnost. Elasticke vlastnosti jsou poněkud zlepšeny.
- **Mangan** – se většinou nepoužívá samostatně, ale s nějakým dalším prvkem, např. Al. V tomto případě se tvoří sloučeniny MnAl, MnAl₆ nebo MnAl₄. Mangan snižuje rozpustnost železa a vytváří relativně neškodné sloučeniny, zvyšuje napětí na mez kluzu a ve slané vodě zvyšuje odolnost slitin GA1 a MgAlZn proti korozi. Maximální obsah Mn je 1,2 – 2 hm. %.
- **Stroncium** – je novou příměsí používanou v hořčíkových slitinách. Zlepšuje odolnost proti creepu a dává výbornou kombinaci slévateľnosti s creepovými vlastnostmi.
- **Stříbro** – zlepšuje zpevnění stárnutím a vlastnosti za vyšších teplot slitin obsahujících thorium nebo vzácné zeminy.
- **Thorium** – propůjčuje slitinám větší odolnost proti creepu až do 350°C. Zlepšuje také slévateľnost. Slitiny jsou svařovateľné. V poslední době jsou postupně vyřazovány, protože thorium je radioaktivní.
- **Vápník** – jako legující prvek se v poslední době používá stále častěji pro vývoj laciných creepu odolných slitin. Jinak může vápník působit jako dezoxidant v tavenině nebo následném tepelném zpracování. Zlepšuje válcovateľnost plechů, ale je-li přítomen v množství větším než 0,3%, snižuje svařiteľnost.

- **Vzácné zeminy** – jsou přidávány do hořčíku pro zlepšení vlastností při vyšších teplotách a pro zvýšení creepové odolnosti. Zpravidla jsou přidávány jako směs Mischmetal (50% Ce a další vzácné zeminy zejména La a Nd) nebo didymium (85% Nd a 15% Pr).
- **Zinek** – je jedním z prvků nejčastěji používaných zpravidla společně s Al (AZ91) nebo se zirkoniem a thoriem.
- **Zirkonium** – je velmi důležitou přísadou pro zjemnění zrna. Může být použito ve slitinách obsahujících zinek, vzácné zeminy, yttrium nebo v jejich kombinaci, ale ne ve slitinách obsahujících Al, Mn, protože ty tvoří stabilní sloučeniny se zirkoniem.
- **Yttrium** – je zpravidla používáno se vzácnými zeminami ke zvýšení pevnosti za vyšších teplot a ke zvýšení creepové odolnosti až do 300°C.[1]

2.4. Slévárenské slitiny hořčíku

Základem slévárenských slitin hořčíku jsou binární slitiny rozšířené o další legující prvky za účelem zlepšení technologických vlastností, mechanických vlastností nebo zvýšení odolnosti proti korozi. Takovými základními systémy jsou Mg-Al, Mg-Zn a Mg-Mn, popř. Mg-Li. Další doplňkové kovy jsou Th, Zr, Si, Ag, Ti a kovy vzácných zemin (La, Ce, Nd, Pr, Sc, Gd, Y). Specifickým slévárenským problémem je vysoká hořlavost hořčíkových slitin v roztaveném stavu. Tavenina musí být chráněna vhodnou struskou nebo atmosférou, která se vyvíjí při hoření sirného květu na hladině taveniny. Pro snížení vznítivosti doporučují někteří metalurgové přísadu berylia 0,005 až 0,2 % [14] nebo přísadu 0,2 % vápníku. Vyšší obsah vápníku však zhoršuje odolnost proti korozi.

2.4.1. Použití hořčíkových slitin a jejich rozdělení

Hořčíkové slitiny nalézají využití zejména v leteckém a automobilovém průmyslu z důvodu jejich výhodných vlastností, spočívajících v kombinaci pevnosti (160-365 MPa),

elastického modulu (45 GPa) a nízké hmotnosti (1741 kg/m^3), což je přibližně o třetinu méně než činí měrná hmotnost slitin hliníkových a téměř čtyřikrát méně v porovnání s měrnou hmotností litiny a oceli.

Hořčíkové slitiny mají vysoký poměr napětí / hmotnosti srovnatelný s ostatními konstrukčními materiály. Magnesium má relativně dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. Rovněž vysoké jsou jeho charakteristiky útlumu, takže je schopen utlumovat elastické vibrace.

K praktickému využití k designu v technické praxi jsou využívány dvě majoritní skupiny hořčíkových slitin.

Do první skupiny (I.) patří slitiny s obsahem 2-10% Al, případně s minoritním obsahem Zn a Mn. Tyto slitiny se vyrábějí s průměrnými náklady a jejich mechanické vlastnosti dosahují příznivých hodnot v rozmezí teplot $95\text{-}120^\circ\text{C}$. Jejich vlastnosti se se zvyšující teplotou rapidně zhoršují.

Druhá skupina (II.) zahrnuje slitiny hořčíku s různými prvky (např. vzácných zemin: Zn, Th, Ag a Si) kromě Al, ale vždy s malým, ale efektivním obsahem Zr, který zajišťuje jejich jemnozrnnou strukturu a tak vede ke zvýšení jejich mechanických vlastností. Tyto slitiny rovněž vykazují lepší vlastnosti při zvýšených teplotách, avšak přidavek dražších příměsových prvků v kombinaci se specializovanou technologií vede ve svém důsledku ke zvýšení výrobních nákladů.

Z hlediska mikrostrukturních charakteristik tuto skupinu detailněji dělíme na:

- II.a) Mg – Zn – Zr (bez nebo s přidavkem Th),
- II.b) Mg – kovy vzácných zemin + Zr (bez nebo s přidavkem Zn nebo Ag),
- II.c) Mg – Th – Zr (bez nebo s přidavkem Zn),
- II.d) Mg – Li – Al.

V hořčíku se relativně dobře rozpouští Al nebo Zn, ale jejich rozpustnost značně klesá při nízkých teplotách. Maximální rozpustnost Al je 12,7% při 437°C a 3% při 93°C . Rozpustnost Zn je 6,2% při 340°C a 2,8% při 204°C . Rozpustnosti Mn, Zr, Ce jsou menší než 1% při 482°C . 4,8% Th se rozpouští při eutektické teplotě.

Přídavek Mn v hořčíkových slitinách zlepšuje korozní stabilitu slitin, které obsahují Al, resp. Zn. Některé z nich využívají Mn jak ke kontrole Fe, tak i ke snížení jeho aktivity. Jsou vhodné tam, kde je vyžadována vysoká odolnost proti korozi. Slitiny neobsahující Al a Zn, ale Yt vykazují rovněž dobrou odolnost vůči korozi [15].

2.4.2. Přednosti odlitků z hořčíkových slitin

Vynikající slévárenské vlastnosti odlitků z hořčíkových slitin umožňují odlévat odlitky složitých tvarů a různých velikostí. Důsledným využitím této přednosti je možno vyrobit jako jeden odlitek i díl, který je jinak nutno montovat z několika součástí. V tomto smyslu nabízejí hořčíkové slitiny možnost další úspory nákladů.

Mezi ekonomické přednosti hořčíkových slitin je potřeba zařadit také jejich dobrou recyklovatelnost, která dává možnost jednak zpracovávat vlastní odpady ve slévárně, jednak usnadňuje likvidaci součástí po skončení jejich životnosti. Tento faktor nabývá zvláštní důležitost, neboť v současnosti jsou ve vyspělých státech přijímána zákonná ustanovení o povinnosti výrobce zajistit likvidaci vlastního výrobku s maximálním novým využitím použitých materiálů. V perspektivě zvyšování celkové spotřeby hořčíkových slitin je také možno očekávat snižování cen v důsledku vyššího využití zpracovatelných odpadů [11].

Klíčové výhody hořčíkových slitin :

1. Většina hořčíkových slitin má výbornou tekutost a zabíhavost, což je výhodné u tvarově složitých a tenkostěnných odlitků.
2. Mg slitiny mají nižší hodnoty specifického objemového tepla než slitiny Al a Zn, tzn. že odlitky z Mg slitin chladnou rychleji, což umožní zrychlení licího cyklu a tím pádem i snížení opotřebení nástroje.
3. Mg a jeho slitiny se vyznačují velmi nízkou hustotou, tzn. že stejných vtokových podmínek může být dosaženo nižšími tlaky.
4. Fe z nástroje má velmi nízkou rozpustnost v tekutých Mg slitinách, je tedy sníženo nebezpečí tzv. lepení na nástroj (nejčastěji se s tímto jevem setkáváme u Al slitin).
5. Ze všech výše uvedených výhod vyplývá hlavní výhoda - prodloužení životnosti nástroje na dvoj- až trojnásobek v porovnání se slitinami Al [15].

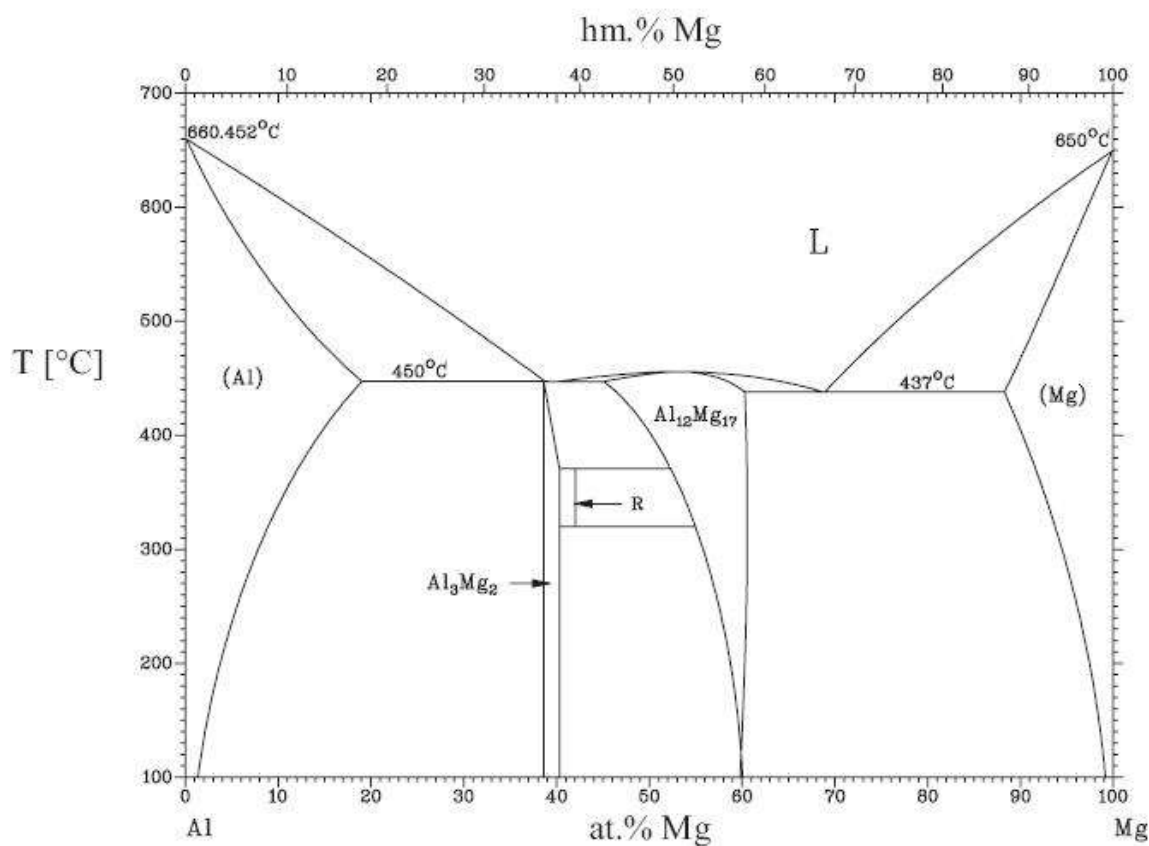
2.5. Typy hořčkových slitin

2.5.1. Hořčkové lité slitiny

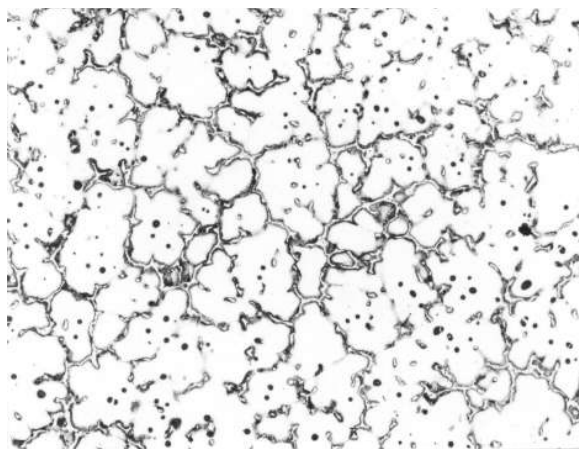
Většina odlitků hořčkových slitin se vyrábí tlakovým litím s vysokým stupněm produktivity a vysokou přesností výrobků, které bývají často velmi tvarově bohaté. Vysoká rychlost ochlazování způsobuje, že se tyto odlitky nedají svařovat a jsou nevhodné pro tepelné zpracování.

- **Slitiny Mg - Al**

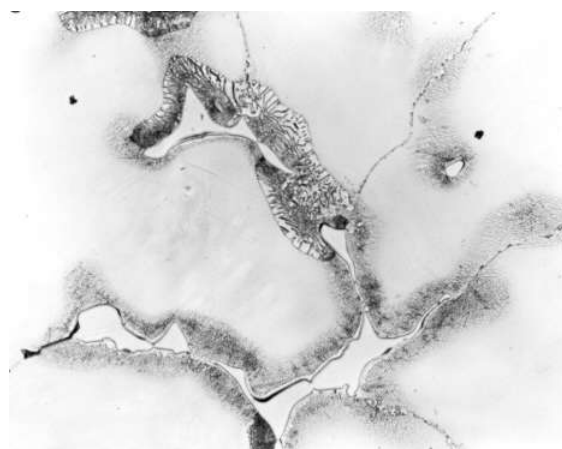
Slitiny typu Mg-Al-(Zn, Mn) jsou nejrozšířenější slitiny pro slévárenské účely. Mohou obsahovat ještě další legující prvky (Zr, Th, Ag a Ce). Jsou nejstarší skupinou slitin hořčíku. Jejich užité vlastnosti jsou dány existencí relativně široké oblasti tuhého roztoku δ v rovnovážném diagramu Mg-Al (obr.3) a možností změnit chemické složení přidáním dalších prvků. Nejrozšířenější z těchto slitin jsou slitiny s obsahem 7 až 10 % Al. Slitiny s vyšším obsahem hliníku než 7 % jsou vytvrditelné a bývají doplněny malým množstvím zinku a manganu. Slitiny jsou tvořeny tuhým roztokem δ případně eutektikem $\gamma + \delta$. Tepelné zpracování je založeno na precipitačním vytvrzování za tvorby precipitátu fáze γ ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$). Struktura je uvedena na obr.4 [17]. Na rozpustnost hliníku v tuhém roztoku δ a na polohu eutektického bodu má vliv modifikace, rychlost ochlazování a tlak při lití [16]. Tyto parametry lze tedy v širokých mezích ovlivňovat použitou slévárenskou technologií a je možno jich využít pro výrobu odlitků různých vlastností. Např. slitina MgAl_6Mn vykazuje velmi dobré mechanické vlastnosti ($R_m = 190$ až 230 MPa, $A_5 = 5$ až 8 %) a odlévají se z ní gravitačním litím do písku i tlakovým litím do kokilů, disky kol pro automobily. Zinek ve slitinách Mg-Al se převážně rozpouští v hořčíku a rovněž se stává složkou precipitující fáze. Při určitém koncentračním poměru s hliníkem $\text{Zn/Al} = 1/3$ vzniká ve slitině Mg-Al- Zn intermetalická fáze T ($\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Zn}_3$).



Obr.3 Binární diagram systému hořčík – hliník [10].



Obr.4a Struktura slitiny AZ91,
zvětšení 50x [17]



Obr.4b Detail z obr.2a, zvětšení 400x [17]

- Slitiny Mg - Mn

Chemické složení této skupiny slitin je voleno tak, aby koncentrace hlavního legujícího prvku – manganu – byla pod 2,1%. Binární diagram Mg-Mn je v podstatě peritektický typ a slitina je při úplném ochlazení po stránce strukturní tvořena tuhým roztokem a vyloučenou

fází. Právě disperzní forma vyloučení fáze dodává slitině potřebnou pevnost a tvrdost. Slitina má vedle průměrných slévárenských vlastností vysokou korozivzdornost, dobrou svařitelnost, minimální mez pevnosti 10 kP/mm², minimální tažnost 4%, tvrdost 35 HB, lineární smrštění se uvádí 1,6 -1,9% [18].

Hlavní použití: pro odlitky poměrně málo složité, pro případy navařování či svařování odlitků, se zvýšenými požadavky na korozivzdornost.

- **Slitiny Mg - Zn**

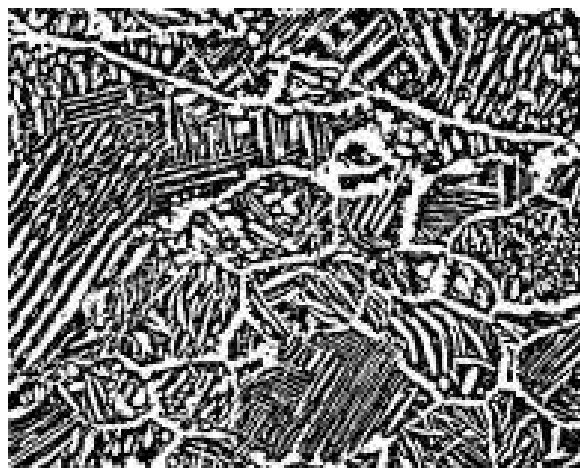
Hořčíkové slitiny se zinkem se z hlediska strukturních složek podobají slitinám s hliníkem. Obsah zinku ve slévárenských slitinách nebývá větší než 1 až 2 %. V binárním diagramu je patrná změna rozpustnosti s teplotou. Pod křivkou solvu se vylučují precipitáty fáze β (Mg₇Zn₃). Ve slitinách s vyšším obsahem Zn obsahujících také hliník dochází k tvorbě precipitátů Mg₃Al₂Zn₃ (fáze T). Slitiny se zpracovávají precipitačním vytvrzováním, tj. rozpouštěcím žíháním 380°C/10 hod. s ochlazením ve vodě. Stárnutí se buď vynechává (vzniká pouze přesycený tuhý roztok) nebo se výjimečně zařazuje stárnutí umělé. Technické slitiny hořčíku se zinkem obsahují také mangan (z důvodu zvýšení odolnosti proti korozi) nebo zirkon, popř. ještě kovy vzácných zemin (RE). Tyto přísady výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti a zvětšují oblast použitelnosti slitin zejména k vyšším teplotám (minimálně do teploty 300°C). Slitiny se zinkem, zirkonem a RE mají např. creepové vlastnosti lepší než žárovevné slitiny hliníku, a to při nižší měrné hmotnosti. Obsah zirkonu je volen ve všech případech 0,25 až 0,7 %. Jeho vliv spočívá ve výrazném zjemnění struktury, a tím ovlivnění pevnostních charakteristik. Slitiny hořčíku obsahující zirkon se dělí na tři podskupiny [14]: slitiny hořčíku se zinkem a RE, slitiny hořčíku s RE a slitiny hořčíku s thoriem. Ve všech případech má zirkon vliv na zjemnění zrna. Vyšší obsah zinku sice umožňuje precipitační vytvrzování, ale zhoršuje slévárenské vlastnosti (vznik mikroporovitosti a praskání za vyšších teplot). U těchto slitin se obsah zinku ustálil na hodnotě přibližně 5 %, obsah RE na 4 %. Z kovů vzácných zemin se pro legování slitin hořčíku používá zejména prvků skupiny lanthanidů (Ce, La Pr, Dy), které mají s hořčíkem podobný rovnovážný diagram se změnou rozpustnosti v tuhém stavu. Pod křivkou solvu precipituje velmi stabilní fáze Mg₉(RE), která zajišťuje vysoké mechanické vlastnosti do pracovních teplot až 250°C.

- **Slitiny Mg - Li**

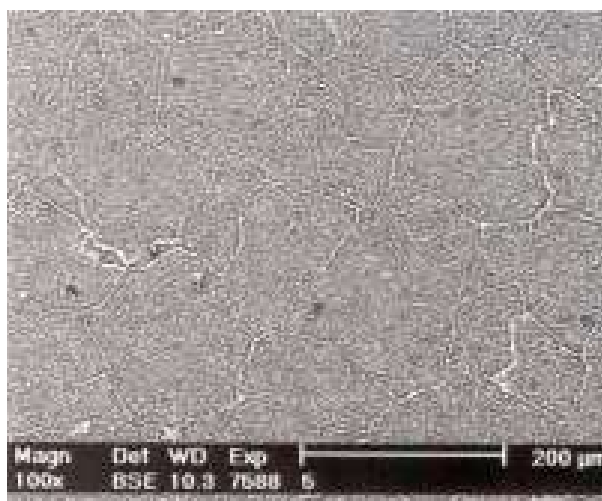
Slitiny hořčíku s lithiem patří mezi nejlehčí a perspektivní konstrukční materiály. Tyto slitiny lze rozdělit na slitiny binární a slitiny vícekomponentní. Slitiny hořčíku a lithia dosahují velmi nízkých měrných hmotností $1\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ až $1\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Binární slitiny (obr. 5) mohou být podle obsahu lithia tvořeny fází α (do 5,7 hm. % Li), směsí $\alpha + \beta$ (5,7 až 10,4 hm. % Li) a fází β (nad 10,4 hm. % Li). Fáze alfa má hexagonální těsně uspořádanou mřížku, fáze beta je kubická prostorově centrovaná. Krystalická stavba mění ve značném rozsahu mechanické vlastnosti jednotlivých slitin i vlastnosti technologické (zejména tvařitelnost). S růstem obsahu lithia se pevnost slitin Mg-Li snižuje, avšak modul pružnosti a mez kluzu v tlaku je vyšší než u většiny hořčíkových slitin. Nedostatkem hořčíkových slitin s lithiem je velká reaktivita komponent v roztaveném stavu, malá odolnost proti tečení a nestabilita mechanických vlastností za pokojových teplot. Intenzivní výzkum slitin Mg-Li vyvolaný rozvojem letecké a raketové techniky vedl v Rusku a USA k vývoji několika přednostních typů slitin (USA: LA141A ($\text{MgLi}_{14}\text{Al}_1$), LS141A, LZ141A, Rusko: VMD5, MA18 a MA21). Výroba slitin hořčíku s lithiem je provázena řadou metalurgických problémů spočívajících zejména v rozdílu teplot tání obou kovů, rozdílu měrných hmotností a rozdílu tenze par [18].



Obr. 5a Struktura binární slitiny Mg-Li,
(fáze α), 3,7 % Li [17]



Obr. 5b Struktura binární slitiny Mg-Li
(fáze $\alpha + \beta$), 7,6 % Li [17]

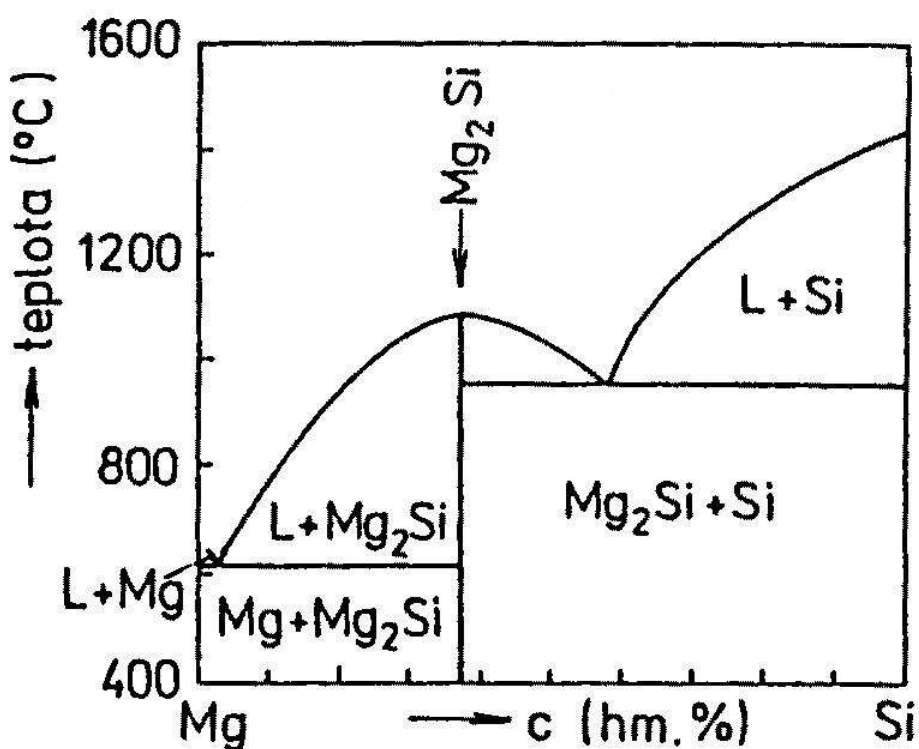


Obr. 4c Struktura slitiny Mg-Li-Al-Zn [17]

- **Slitina Mg – Si**

Slitina s uvedenou kombinací prvků je založena na rovnovážném diagramu.

Chemické složení je voleno tak, že jde prakticky o eutektickou slitinu s 1,0 – 1,5% Si. Eutektikum + Mg_2Si je podobné eutektiku siluminů, má jehlicovitou strukturu a tím i zvýšenou křehkost. Vzhledem k tomu, že tyto slitiny mají horší slévárenské vlastnosti než jiné slitiny na bázi hořčíku i nízké mechanické vlastnosti, které není možno zvýšit tepelným zpracováním, bylo od používání těchto slitin upuštěno [18].



Obr.5. Rovnovážný binární diagram hořčík – křemík [10].

- **Slitiny Mg-Al-Zn**

Rozpustnost hliníku v hořčíku je při eutektické teplotě 11,5 % a klesá postupně až na cca 1 % při pokojové teplotě. Eutektická reakce probíhá při 437°C a tvoří se směs a fáze (substituční tuhý roztok Al v Mg) a b fáze ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$). Zinek ve slitině AZ91 zlepšuje pevnost, ale na druhé straně zvyšuje tendenci k tvorbě mikropórů. Odolnost proti korozi je uspokojující.

- **Slitiny Mg-Al-Ca**

Byly vyvinuty jako levnější alternativa za slitiny se vzácnými zeminami pro aplikace při vyšších teplotách. Jsou-li vápníkem legovány slitiny Mg-Al, precipitační proces závisí na poměru Ca/Al. Při poměru 0,8 nalézáme částice Mg_2Ca resp. Al_2Ca . Obojí precipitáty vedou k zvýšení tvrdosti.[8]

- **Slitiny Mg-Al-Sr**

Jsou v hořčíkových slitinách novinkou. Sr by mělo zlepšit creepové vlastnosti slitin Mg-Al.

- **Slitiny Mg-Al-Si**

Tyto slitiny byly poprvé průmyslově použity koncernem Volkswagen v 70. letech minulého století. Legování křemíkem vede k tvorbě Mg_2Si precipitátů, které mají nízkou hustotu, vysokou tvrdost a nízký koeficient teplotní roztažnosti. Tyto slitiny mají dva typy intermetalik, které jsou schopny zachycovat dislokace a blokovat hranice zrn a tím zvyšovat odolnost proti creepu.[9]

- **Slitiny Mg-Al-RE**

Tyto slitiny byly vyvinuty jako creepu odolné materiály. Slitiny s čistých komponent jsou poměrně drahé, a proto se vzácné zeminy používají ve směsi s převládajícím jedním prvkem (mischmetal). Tyto slitiny mají dobré creepové vlastnosti. Maximální napětí těchto slitin s rostoucím obsahem Al a RE, zatímco mez kluzu v tahu přednostně závisí na obsahu RE a dosahuje limitní maximální hodnoty. Slitiny Mg-Al obsahující vzácné zeminy jsou vhodné pro tlakové lití, protože při nízkých rychlostech tuhnutí se tvoří hrubé částice Al_2RE , které zabraňují během creepu pokluzu po hranicích zrn.[8]

- **Slitiny Mg-Li-Me**

Pevnost v tahu binárních slitin Mg-Li je pro technické použití většinou příliš nízká. Proto bylo vyvíjeno mnoho kombinací slitin Mg-Li s dalšími přísadovými prvky, vyvolávajícími substituční zpevnění nebo precipitační vytvrzení. Tyto slitiny však obvykle vykazují nedostatečnou stabilitu mechanických vlastností ve vytvrzeném stavu. Nedostatkem je též nízká odolnost proti korozi základních slitin Mg-Li, zejména slitin s vyšším obsahem lithia. Dle starších výzkumů je tato nestabilita binárních slitin způsobena difusibilitou lithia a tvorbou oblastí obohacených lithiem, což vede k odpevnění slitin již za pokojové teploty. Tento nežádoucí pochod lze potlačit přísadou prvků s vysokou afinitou k lithiu, např. vodíkem. Takové materiály se připravují roztavením základní slitiny v atmosféře argonu, jejím zpracováním v plasmatu, následujícím rozprašením v inertním plynu a kompaktizováním [9].

2.5.2. Slitiny hořčíku pro tváření

Slitiny hořčíku krystalizují v hexagonální, těsně uspořádané soustavě a vykazují za normální teploty pouze jeden skluzový systém. Tvárnost těchto materiálů se zlepšuje nad teplotou 220°C, kdy vstupují do funkce další skluzové systémy a kdy se projevují rekrystalizační procesy. Plastická deformace by měla být podle typu slitiny volena tak, aby teplota tváření ležela nad teplotou solvu. Nejčastějšími technologiemi tváření je protlačování profilů, válcování plechů, popř. volné nebo zápustkové kování. Tvářecí teploty tedy leží v intervalech: kování 200 až 300°C, protlačování 300 až 400°C a válcování 400 až 500°C [18].

2.6. Technologické vlastnosti slitin Mg

Technologie tváření vybraných hořčíkových slitin je dána specifikem hexagonální krystalické mřížky základního tuhého roztoku a stavem mikrostruktury. V současné době pracuje řada výzkumných pracovišť na ověření podmínek jejich superplasticity. Spojování slitin hořčíku je možno provádět téměř všemi běžnými postupy.

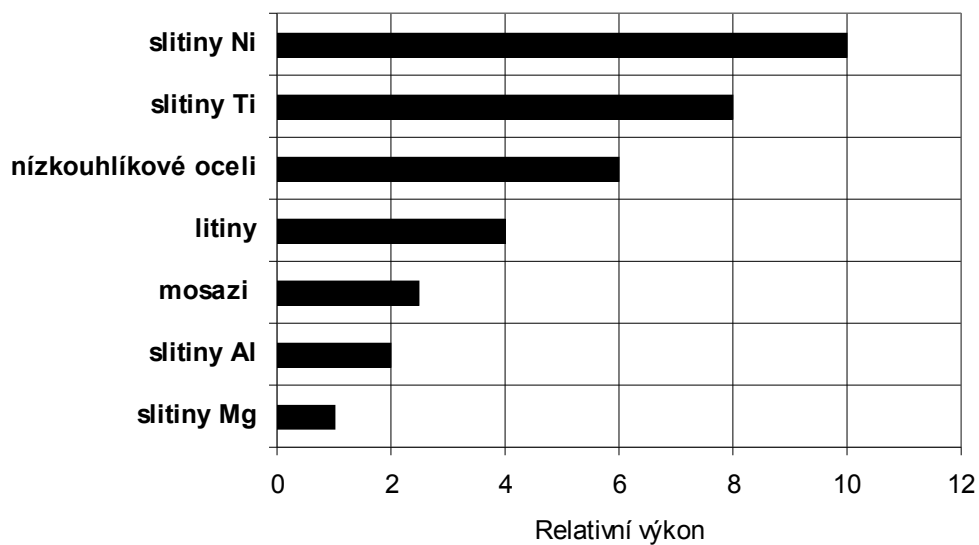
Při obloukovém svařování pod inertním plynem je třeba brát v úvahu specifika materiálu, přídavného kovu a tvaru svařovaných dílů. Jako přídavný materiál se bere s dostatečným výsledkem slitina která se svařuje. Výborné výsledky byly získány při použití přídavného materiálu ze slitin typu HM 21 a HM31 (s thoriem a manganem).

Bodové a švové svařování vykazuje velmi dobré pevnosti spojů při aplikaci statického namáhání. Není však vhodné pro namáhání únavové, nebo tam, kde svařenec bude podroben vibracím.

Významná a perspektivní je technologie spojování hořčíkových slitin lepením. Únavové charakteristiky lepených spojů jsou lepší než u jiných postupů spojování. Při lepení nedochází ke vzniku koncentrátorů napětí (strukturním a mechanickým vrubům). Technologie se osvědčuje zejména u výrobků s malou tloušťkou stěn a je tedy přínosná zejména v leteckém průmyslu.

Nýtování je u slitin hořčíku rovněž běžná technologie spojování. U plechů je však třeba dbát na kvalitu povrchu otvorů. Jemné praskliny vzniklé při prostřihování otvorů výrazně snižují nosnost spoje. Dalším problémem je volba materiálu nýtů. Nýty a základní materiál nesmí tvořit elektrické mikročlánky.

Řezné obrábění je technologie tvarování pro hořčíkové slitiny velmi výhodná. Důvodem je vynikající obrobitelnost při použití velké škály řezných rychlostí. Obráběním za mokra v emulzích se dosahuje výborných kvalit obráběného povrchu. Obrázek 6. znázorňuje relativní výkon potřebný pro obrobení stejného objemu materiálu při standardních řezných podmínkách.

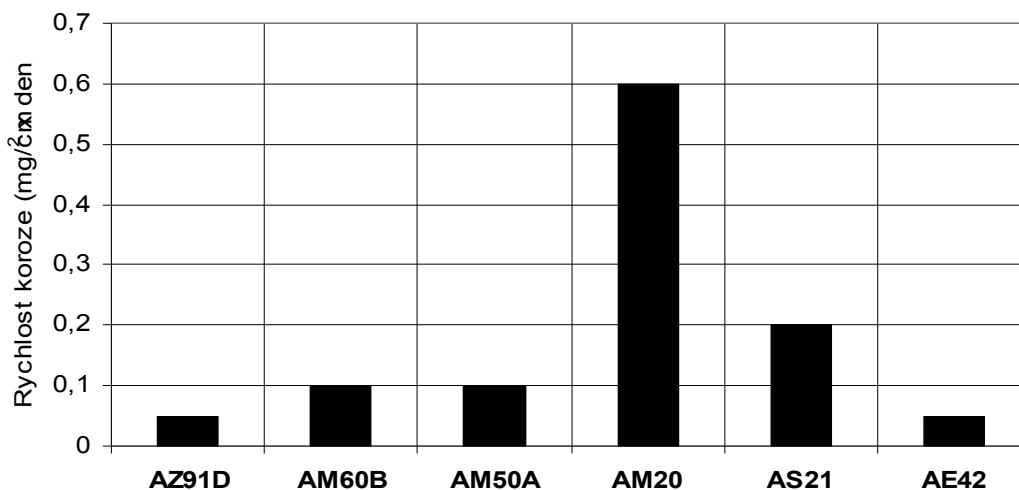


Obr.6. Relativní výkon potřebný pro obrábění stejného objemu materiálu při standardních řezných podmínkách [18].

Pro obrábění se nejčastěji používají nástroje ze slinutých karbidů, rychlořezné oceli a nástroje keramické. Při použití olejo-vodných emulzí pro obrábění za mokra je třeba brát v úvahu možnost vývoje plynného vodíku, který je v koncentracích 4 až 74 % vznětlivý [18].

2.7. Degradací procesy v hořčíkových slitinách

Je všeobecně známo, že hořčíkové slitiny o vyšší čistotě mají stejné a lepší korozní vlastnosti než slitiny hliníku. Z toho vyplývá, že pro většinu aplikací, např. v automobilovém a leteckém průmyslu, mohou být odlitky z hořčíkových slitin použity bez povrchových úprav. Porovnání korozních rychlostí v tříprocentním solném roztoku je uveden na obrázku 7.



Obr.7. Korozní rychlost odlitků z hořčíkových slitin [18].

Je zřejmé, že výhodné korozní vlastnosti mají právě nejfrekventovanější slévárenské slitiny. Vývojové slitiny (Mg-Li-Me) jsou korozně velmi málo odolné a jejich povrchová ochrana je vzhledem k jejich dobrým specifickým mechanickým charakteristikám předmětem systematického výzkumu.

Povrchové ochrany se provádějí nejčastěji chromátováním, ale i dalšími postupy (elektrolytické pokovování, plazmové nástříky, organické nátěry aj.) [18].

V automobilovém a spotřebním průmyslu se dnes rozvíjí zejména výroba ochranných povlaků (kryty ručních obráběcích nástrojů - vrtačky, řetězové pily apod.). Nátěrové systémy mají na kovově čisté ploše špatnou přilnavost, proto je nutné je správně předupravit - především se jedná o úpravu povrchu výše zmíněnou technologií chromátování a technologií anodické oxidace (eloxování). Vrstvy vytvořené anodickou oxidací na Mg slitinách mají dobrou korozní odolnost, otěruvzdornost i tvrdost a jsou dobře vybarvitelné.

Nové povlaky se dnes uplatňují i v moderní elektronice, a to zejména u mobilních telefonů či u počítačových komponent, kde i malé poškození povlaku může ohrozit funkci přístroje. Povlakování Mg slitin se bude dále vyvíjet směrem ke zvyšování korozní odolnosti [11].

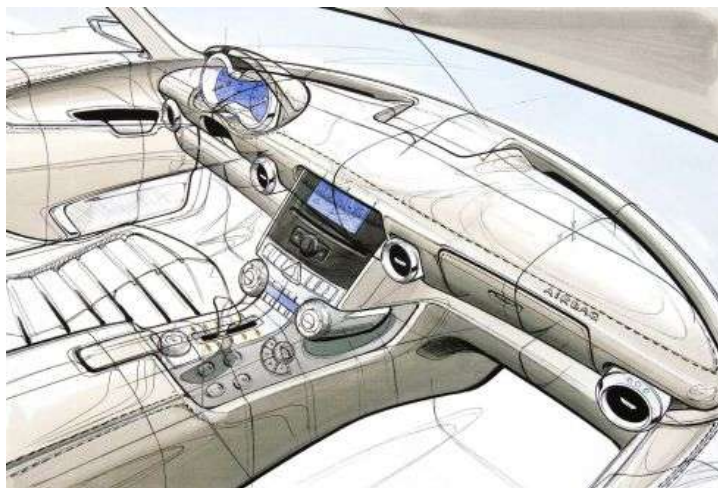
2.8. Charakteristiky a typická použití konkrétních typů hořčíkových slitin

- **AM 60A/B** - slitina pro lití pod vysokým tlakem s vynikající plasticitou ve stavu -F; používaná pro vrtule a automobilová kola.



Obr.8. Lité kolo s hořčíkové slitiny.[10]

- **AS 41 A** - slitina pro lití pod tlakem s dobrými creepovými vlastnostmi do 150 °C; používaná pro součásti automobilů.



Obr.9. Kostry některých automobilů se vyrábí z hořčíkové slitiny.[10]

- **AZ 81A** - slitiny pro lití do písku nebo do kokily pro všeobecné použití při výrobě.



Obr.10. Ukázka rámu těla DSLR z hořčíkové slitiny u fotoaparátu Nikon D2H.[10]

- **AZ91** – tento typ hořčíkové slitiny s obsahem 9% Al a 1% Zn je v praxi nejčastěji používán, zejména pro tlakové lití. Má vynikající zabíhavost a umožňuje odlévat tenkostěnné, tvarově velmi komplikované odlitky. Slitina má vysokou pevnost, ale pouze střední tažnost a rázovou houževnatost. Mechanické vlastnosti se nad teplotou asi 120°C poměrně rychle snižují. Pro aplikace, u nichž se vyžaduje vyšší tažnost a houževnatost, se snižuje obsah Al a Zn je nahrazen Mn a pro teploty nad 200°C se používají slitiny legované KVZ[15].
- **AZ 91C/E** – používá se pro lití některých součástí letadel, strojírenských součástek a skříní převodovek automobilů.



Obr.11. Skříň převodovky automobilu.[10]

- **AZ 91B/D** - slitina pro lití pod tlakem pro všeobecné použití pro součástky automobilů a počítačů, řetězových pil, sportovních náčiní, kamer, promítacích přístrojů, přístrojů a příslušenství pro domácnost.



Obr.12. Kostra laptopu je vyrobena z hořčíkové slitiny.[10]

- **EZ 33A** - slitina pro lití do písku a do kokily pro použití při vysokých teplotách; výborné slévárenské vlastnosti; odolná proti creepu do 250 °C a tlakově těsná; používána v letectví a obranném průmyslu.



Obr.13. Hlava stativu je vyrobena z hořčíkové slitiny.[10]

- **AZ 63** - slitina pro odlévání do kokil pro tzv. obětované anody (protikorozi ochrana boilerů, nádrží, potrubí).[7]

Tab.5. Mechanické vlastnosti vybraných hořčíkových slitin [18].

<i>Slitina</i>	<i>Způsob lité</i>	<i>Tepelné zprac.</i>	<i>Mez pevnosti [MPa]</i>	<i>Mez pružnosti [MPa]</i>	<i>Tažnost [%]</i>	<i>Tvrdost HB</i>	<i>Mez únavy [Mpa]</i>
AZ91E	Do písku	F	(160)	(75)	-	60	65-90
		T4	(235)	(75)	(7)	55	80-105
		T5	(160)	(80)	(2)	62	-
		T6	(235)	(110)	(3)	70	80-105
AZ91B,D	Tlakem	F	235	160	3	63	95
AM60B	Do písku	F	180-240	80-110	8-24	50-65	65-90
			(140)	(80)	(4)	(50)	
			195-245	90-110	8-15	50-65	65-90
			(150)	(110)	(6)	(50)	
AM60A,B	Tlakem	F	220	130	8	55-70	50-70
AM50A	Tlakem	F	205	125	10	55-65	50-65
AS41A	Tlakem	F	210	135	6	60-90	50-70
AS21	Tlakem	F	170	110	4	63	-

Nominální složení slévárenských hořčíkových slitin

Tab.6. Pro lití pod tlakem [18].

<i>ASTM</i>	<i>UNS</i>	<i>Al</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Th</i>	<i>Zr</i>	<i>vzácné</i>	<i>jiné</i>
AM60A	M1060 0	6,0	0,13	0,22	-	-	-	0,5 Si, 0,35 Cu
AS41A	M1041 0	4,25	0,20	0,12	-	-	-	1,0 Si
AS41B	M1041 2	4,25	0,35	0,12	-	-	-	1,0 Si
AZ91A	M1191 0	9,0	0,13	0,7	-	-	-	0,5 Si
AZ91B	M1191 2	9,0	0,13	0,7	-	-	-	0,5 Si, 0,35 Cu
AZ91D	M1191 6	9,0	0,15	0,7	-	-	-	-
AM60B	M1060 2	6,0	0,24	0,22	-	-	-	-
AM50A	M1050 0	4,9	0,26	0,22	-	-	-	-

2.9. Technologie výroby odlitků z hořčíkových slitin

Naprosto převažující technologií výroby hořčíkových odlitků je tlakové lití. Odlitky lité do trvalých forem mají vysokou rozměrovou přesnost a kvalitní povrch. Skutečnost, že hořčík nereaguje s ocelovými formami, tak intenzivně jako hliník, zajišťuje vyšší životnost forem a umožňuje dělat formy s menšími úkosal.

2.9.1. Tlakové lití

Principem výroby je vstřikování roztavené slitiny do dutiny kovové formy pod vysokým tlakem až 500MPa. Za těchto podmínek je možné vyrábět tvarově velmi komplikované odlitky s tloušťkou stěn od přibližně 1-2mm. Rozměry odlitků jsou velmi přesné – u menších rozměrů lze dosáhnout přesnosti až 0,3-0,5%. Ve formách lze používat výhradně kovová jádra. Tvar odlitku musí respektovat možnosti rozebírání formy a vytažení volných částí a jader. Velká část otvorů se předlévá. Životnost u menších forem dosahuje až 100.000 i více odlití. Vzhledem k nutnosti amortizace forem je technologie tlakového lití vhodná pouze pro vysokosériovou a hromadnou výrobu odlitků.

K lití se používají stroje s teplou nebo studenou komorou.

Součástí stroje s teplou komorou je udržovací pec, v níž je teplá komora ponořena. Kov se při transportu z lázně do stroje prakticky nedostává do styku s atmosférou, což je u slitin hořčíku velmi cenné. Rovněž teplotní ztráty jsou minimální.

U strojů se studenou lici komorou je kov do stroje dávkován z externí udržovací pece. Transport kovu se provádí některým ze způsobů, který zamezuje styku s atmosférou.[2]

Tab. 7. Porovnání parametrů stroje s teplou a studenou komorou.[2]

	Stroje s teplou komorou	Stroje se studenou komorou
Uzavírací síla	do 9 MN (900t)	do 45 MN (4500t)
Lisovací tlak	15 -20 MPa	30 – 90 MPa
Hmotnost dávky kovu	do 5 – 6 kg	do 60 kg
Produktivita	i více než 100 odlití/hod.	nižší než 60 odlití/hod.
Dosažitelná tloušťka stěn	1 mm	1,5 – 2,5 mm

Velkým problémem při tlakovém lití hořčíkových slitin pod tlakem je velká turbulence a s tím spojená oxidace kovu během lití. Velmi výhodné je odlévání do vakuových forem. V tomto případě je dutina kovové formy před litím evakuována na úroveň tlaku přibližně 8 kPa. V tomto případě téměř odpadá problém oxidace kovu a problém odvodu plynů z formy během lití. K tomu je však nutné příslušné zařízení a formy jsou složitější – z toho vyplývají i vyšší výrobní náklady.[2]

2.9.2. Odlévání do pískových forem

Technologie, která se používá v podstatně menší míře než tlakové lití, a to na kusovou a malosériovou výrobu speciálních odlitků. Odlévá se klasickým způsobem, při němž je však po celou dobu nutno dbát na ochranu kovu před atmosférou. Při lití se musí proud kovu zaprašovat práškovou sírou. Síra se rovněž přidává do formovacích směsí, aby se zamezilo hoření kovu ve formě. Problémem gravitačního lití je špatná schopnost dosazování kovu při tuhnutí, způsobená širokým intervalem tuhnutí a malým dosazovacím tlakem.

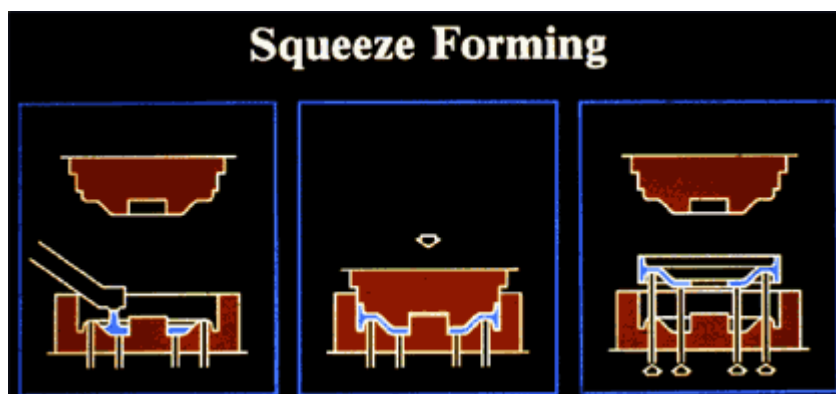
2.9.3. Speciální technologie odlévání

Lití s krystalizací pod tlakem – Squeeze Casting

Metoda je progresivní, dosud málo rozšířenou metodou lití do kovových forem, která v sobě kombinuje výhody pomalého plnění formy a vysokého tlaku během tuhnutí. Podle způsobu provedení se provádí tzv. přímý nebo nepřímý squeeze casting.

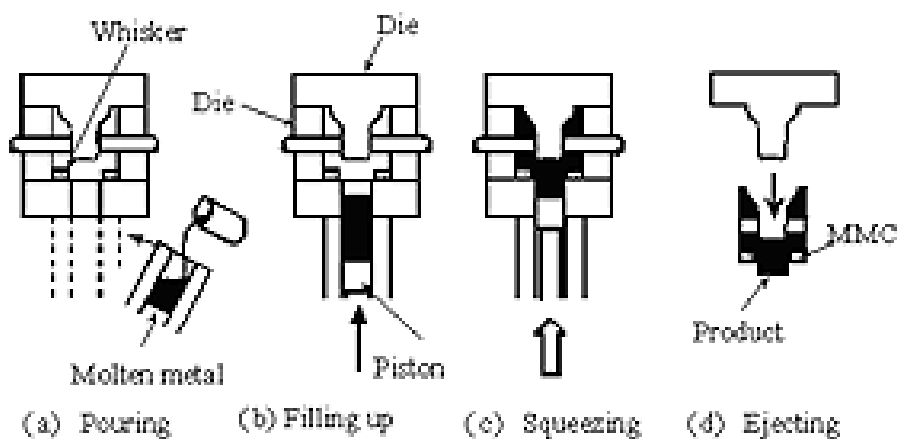
- **Přímý Squeeze Casting** – přesně odměřená dávka kovu se nalije do spodní části kovové formy připomínající raznici. Kov se uzavře a stlačí horní částí formy (razníkem). Tlak působí po celou dobu tuhnutí. Po ztuhnutí se odlitek pomocí

vyhazovačů vytlačí z formy. Metoda je vhodná pro výrobu relativně masivních odlitků [21].



Obr.14. Přímé odlévání metodou squeeze casting[10]

- **Nepřímý Squeeze Casting** – připomíná způsob lití se studenou komorou. Kov se dává do komory lisu pod vlastní kovovou formou. Válec se vrátí do pracovní polohy a kov se velkými zářezy malou rychlostí vytlačuje do formy. Rychlost proudění je malá, řádově 0,5 m/s kov proto proudí laminárně, nedochází k jeho víření a oxidaci. Lisovací tlak až 150 MPa působí během celé doby tuhnutí[21].



Obr.15. Nepřímé odlévání metodou squeeze casting[10]

Odlévání metodou Thixocasting

Thixocasting je novou progresivní metodou, která je svým charakterem na pomezí mezi odléváním a lisováním. Principem metody je zhotovení výchozích těles vsázky, hmotností odpovídajících konečnému výrobku, ohřev každého takového tělesa do teplotní oblasti mezi solidem a likvidem, následuje vložení do lisovací komory tlakového stroje a vtlačení materiálu do dutiny kovové formy[21].

Metoda Semi Solid Metalworking

Je to proces založený na speciálně upravené konzistenci materiálu (např. jemné granule slitiny Mg), který se při vstřikování do tlakové formy převádí do polotekutého stavu (teplota mezi likvidem a solidem) podobného konzistenci „horké plastelíny„. Výhodou je získání odlitku bez staženin a globulární struktura[21].

Tab.8. Porovnání mechanických vlastností slitin, vyrobených různými technologiemi.[1]

Slitina	Technologie	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A (%)	Lomová houževnatost (MPa)
A 356 (AlSi7MgO4)	Lití do kokil	250	210	7,0	15,2
	Squeeze casting (150MPa)	345	300	9,3	28,5
	Thixocasting	340	285	8,9	26,3
A 2024 (AlCu4Mg1)	Lití do kokil	450	380	4,2	19,6
	Squeeze casting	460	400	6,3	27,2
	Thixocasting	465	410	6,5	27,0

2.9.4. Tepelné zpracování hořčíkových slitin

Účelem tepelného zpracování je zejména zvýšení mechanických vlastností, snížení vnitřních pnutí v odlitcích nebo ovlivnění způsobu rozložení prvků ve struktuře.

- **Žihání**

Je druh tepelného zpracování. V technické praxi rozeznáváme několik druhů žihání, a sice na odstranění vnitřních pnutí, stabilizační, na měkko, homogenizační a rozpouštěcí, přičemž každý z těchto procesů má svá specifika. Žihání se provádí nejčastěji v rozmezí teplot 200 – 450°C a jelikož se jedná o procesy dlouhodobé, tak jednotlivé procesy mohou probíhat v časových úsecích od jedné hodiny výše[9].

U hořčíkových slitin se nejčastěji provádí tyto dva způsoby žihání :

- **Žihání pro odstranění vnitřního pnutí**

Provádí se při teplotách 200 – 250°C po dobu 6 – 8 hodin s následujícím pomalým ochlazováním v peci nebo na vzduchu. Úkolem je snížení vnitřních pnutí v odlitcích. Pro dokonalé snížení vnitřních pnutí je nutno žihací teploty zvýšit až na 250 – 350°C, přitom však hrozí snížení určitých pevnostních charakteristik[9].

- **Rozpouštěcí žihání**

Rozpouštěcí žihání je proces, při kterém dochází k ohřevu materiálu na teploty 380 - 450°C, potom následuje výdrž na dané teplotě nejčastěji v rozmezí 3 – 6 hodin. Poté nastává prudké ochlazení z žihacích teplot na teploty maximálně 150 -200°C. Jako ochlazovací medium se používá studená voda. Doba mezi vyjmutím odlitku z pece a ponořením do vody musí být co nejkratší. Výsledkem je rozpuštění intermetalických fází obsahujících vytvrzující přísady[9].

3. Experimentální část

Úkolem této diplomové práce je studium vybraných vlastností hořčíkových slitin. V mém případě se jedná o provedení tahové zkoušky na vzorcích zadané slitiny na trhacím stroji při různých teplotách zkoušené slitiny, provedení termické analýzy čistého Mg, slitiny AZ91

a slitiny AM60 odlévaných do tří různých typů kelímků a provedení difuzní analýzy na vzorcích slitin AZ91 a AM60.

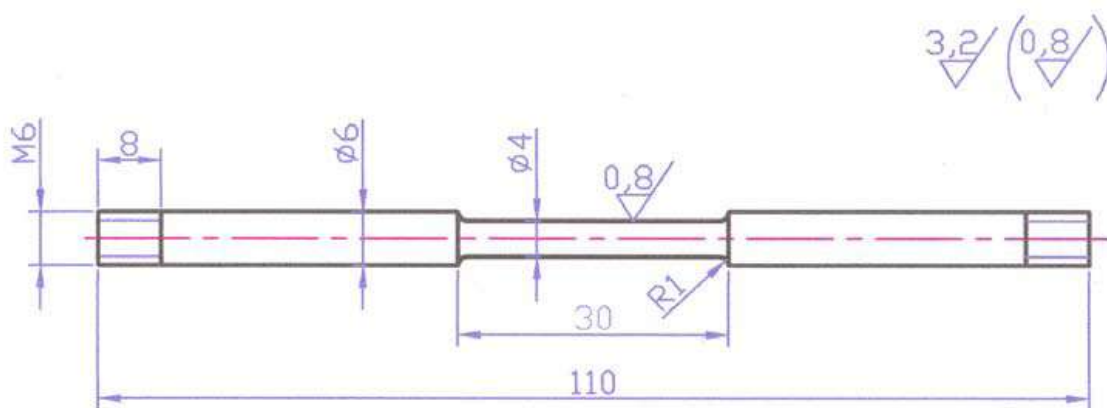
3.1. Tahová zkouška

3.1.1. Příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku byly získány přetavením hořčikové slitiny. Slitina byla přetavena v indukční vakuové peci značky Leybold – Heraeus pod ochrannou atmosférou, kterou tvořil argon. Slitina byla odlévána do kokily o vnitřním rozměru 100 x 155 x 10 mm. Po natavení a odlití zkušebních tyčí byly tyto vzorky ponechány v peci k vychladnutí, poté byly vzorky nařezány pilou zn. Metasecar a obrobeny na požadované rozměry.



Obr.16. Zkušební tyč odlitá speciálně pro účely tahové zkoušky



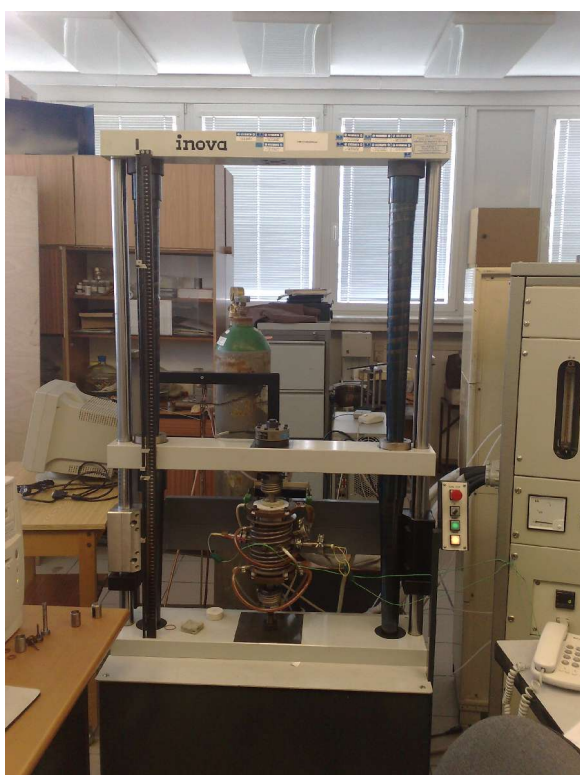
Obr.17. Rozměry zkušební tyče

3.1.2. Provedení tahových zkoušek

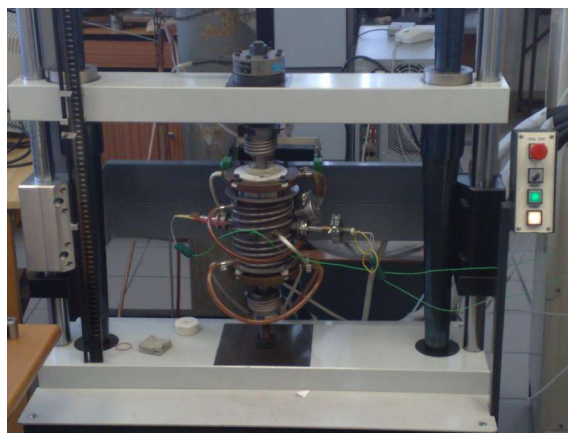
Připravené zkušební vzorky slitiny byly podrobeny tahové zkoušce za zvýšených teplot dle normy ČSN EN 10002-5. Zkoušky byly provedeny na trhacím zařízení typu INOVA TSM 20,

které je majetkem VŠB TU Ostrava a nachází se na Katedře slévárenství. Toto zařízení se skládá z mechanického zatěžovacího systému FSM 20 MO3, jenž je uložen v rámu stroje zároveň s modulem a dvěma siloměry o stupnicích 20 resp. 1 kN. Dále je stroj opatřen posuvným závěsným mostem, jež je regulovatelný v rozmezí 0,001 – 500 mm/min.

Použité zařízení umožňuje provést obecnou zkoušku tahem dle normy ČSN EN 10002-1. Ohřev vzorků na dané teploty byl proveden v trubkové peci s grafitovým topným tělesem, které je umístěno mezi čelistmi trhačího zařízení. Teplotu v peci a na vzorku regulují dva moduly Euroterm. Oba moduly jsou přímo řízeny počítačem, který je rovněž opatřen výstupem pro zápis výsledků provedené zkoušky. Celý proces zkoušky probíhá pod ochrannou atmosférou, kterou tvoří argon.



Obr.18. Trhačí stroj značky INOVA



Obr.19. Část trhačího stroje ve které probíhá samotná zkouška včetně ohřevu zkušební tyče.

3.1.3. Příprava vzorků pro vyhodnocení lomových ploch

Z celkového počtu 14-ti zkušebních vzorků bylo vybráno 5 tyčí, které byly nařezány na velikost 1 cm od porušené části, přičemž lomová plocha byla ošetřena průhledným lakem tak, aby nedošlo k jejímu porušení během manipulace se vzorky.

3.1.4. Vyhodnocení vzorků na elektronovém mikroskopu

Lomové plochy vybraných zkušebních vzorků byly vyhodnoceny na rastrovacím elektronovém mikroskopu typu JOEL JSM – 6490 LV, který je rovněž součástí vědeckého zařízení VŠB TU Ostrava jmenovitě katedry materiálového inženýrství. Z každé lomové plochy jsou vyhotoveny snímky. Nejprve je zachycena celá lomová plocha vzorku v 25-ti násobném zvětšení, poté je zachycena struktura na lomu při 300-ta násobném zvětšení a nakonec je struktura lomu zvětšena 1000-krát.



Obr.20. Rastrovací elektronový mikroskop **JEOL JSM-6490LV**.

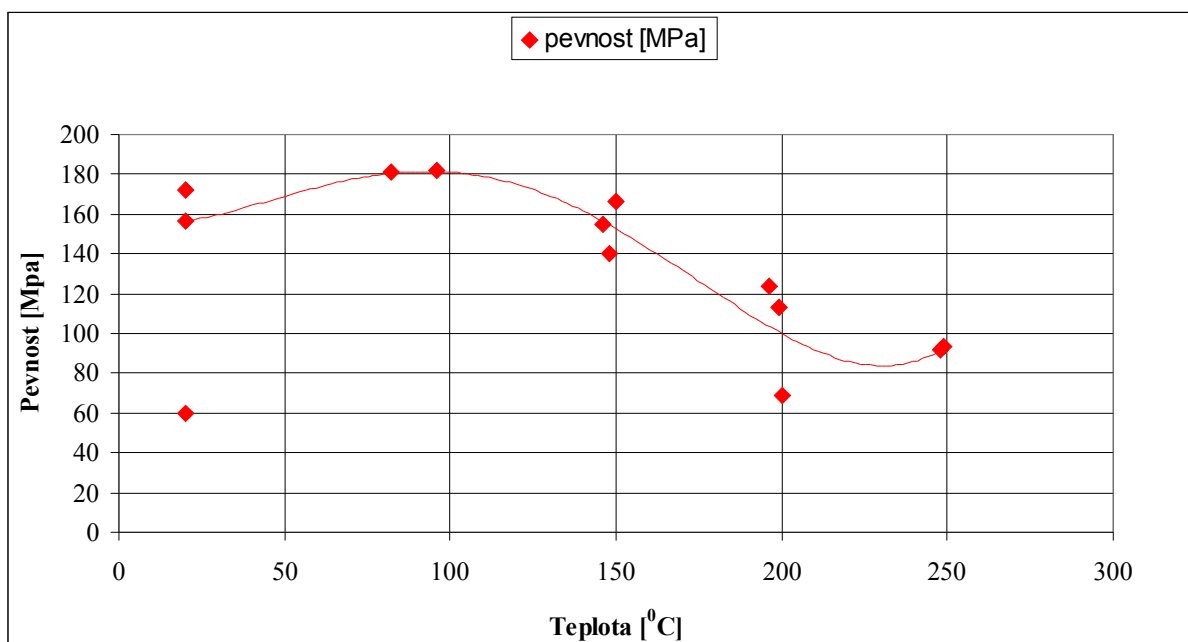
Tab.9. Chemické složení slitiny AZ91 podrobené tahové zkoušce.

Slitina	Obsah prvků ve slitině [%]								
	Zn	Al	Si	Cu	Mn	Fe	Ni	Be	Ostatní
AZ91	0,56	8,8	0,06	0,004	0,20	0,004	0,001	0,0007	< 0,01

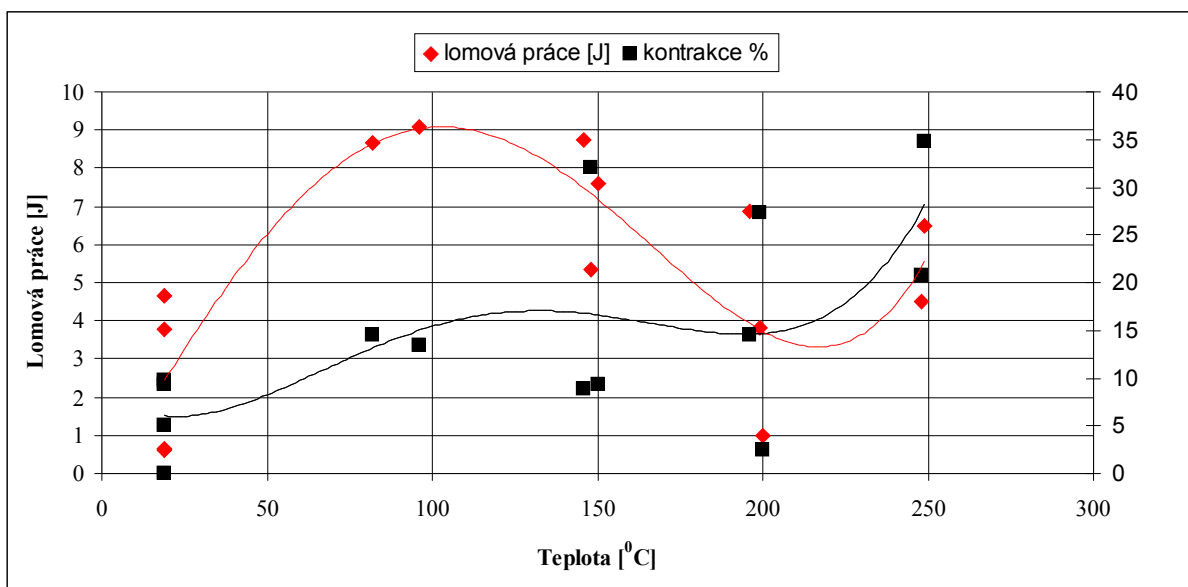
3.1.5. Vyhodnocení výsledků

Tab.10. Vybrané vzorky pro hodnocení

Vzorek číslo	Zkušební teplota	Tahová síla	Průměr lomové plochy	Deformace do lomu	Lomová práce	Pevnost	Kontrakce
	[°C]	[N]	[mm]	[mm]	[J]	[MPa]	[%]
1	19	771,17	4,00	0	0,61	61,35	0,0
2	19	2161,72	3,80	1,23	4,65	171,97	9,8
3	20	757,00	3,90	0,62	0,65	60,22	5,0
4	19	1964,02	3,81	1,17	3,79	156,25	9,3
5	82	2277,01	3,70	1,82	8,67	181,15	14,5
6	96	2282,39	3,72	1,7	9,07	181,57	13,5
7	150	2094,15	3,81	1,17	7,60	166,59	9,3
8	148	1766,75	3,30	4,02	5,33	140,55	32,0
9	146	1946,28	3,82	1,11	8,73	154,83	8,8
10	248	1151,54	3,56	2,62	4,51	91,61	20,8
11	249	1169,52	3,23	4,38	6,49	93,04	34,8
12	199	1417,57	3,41	3,44	3,80	112,77	27,3
13	200	861,91	3,95	0,32	1,01	68,57	2,5
14	196	1560,86	3,70	1,82	6,86	124,17	14,5

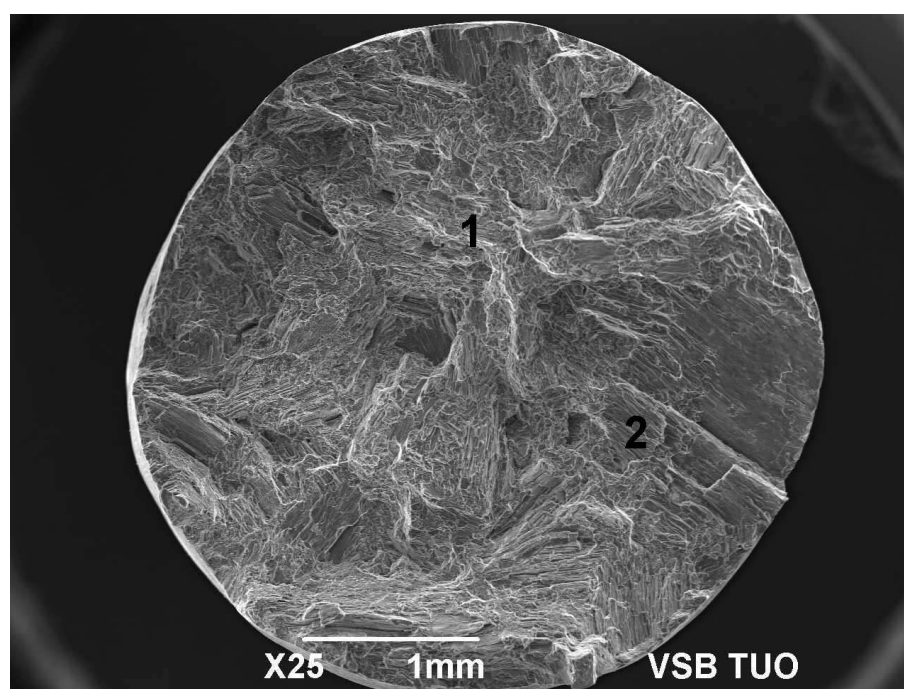


Obr.21. Grafická závislost pevnosti na teplotě zkoušené slitiny AZ91.

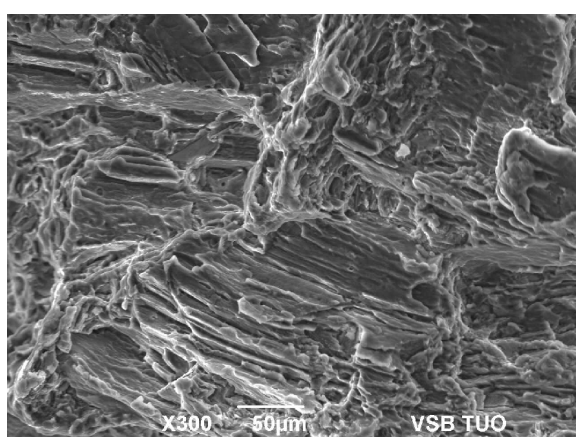


Obr.22. Grafická závislost lomové práce a kontrakce na teplotě slitiny AZ91.

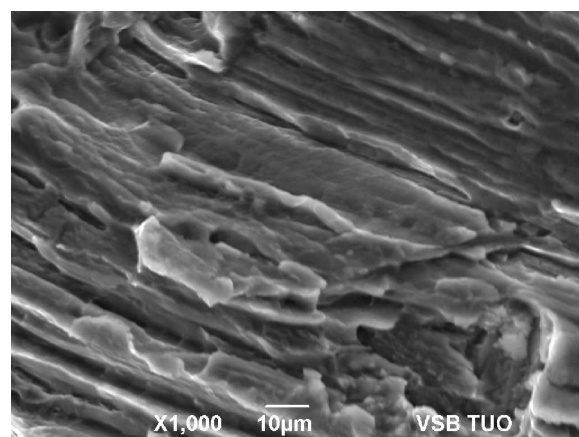
Vzorek č.2. Tahová zkouška provedena při teplotě 19°C.



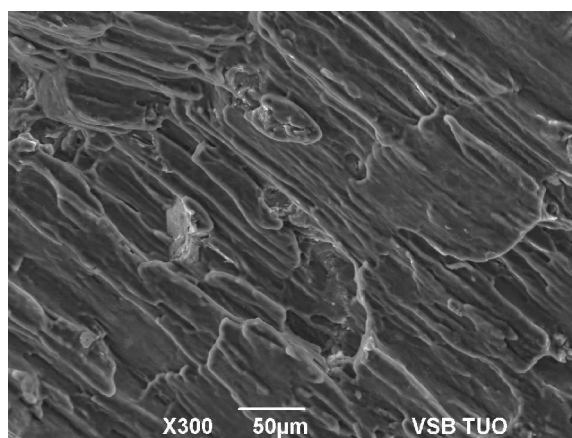
Obr.23. Lomová plocha vzorku č.2.



Obr.24. Struktura v oblasti č.1 na lomu.

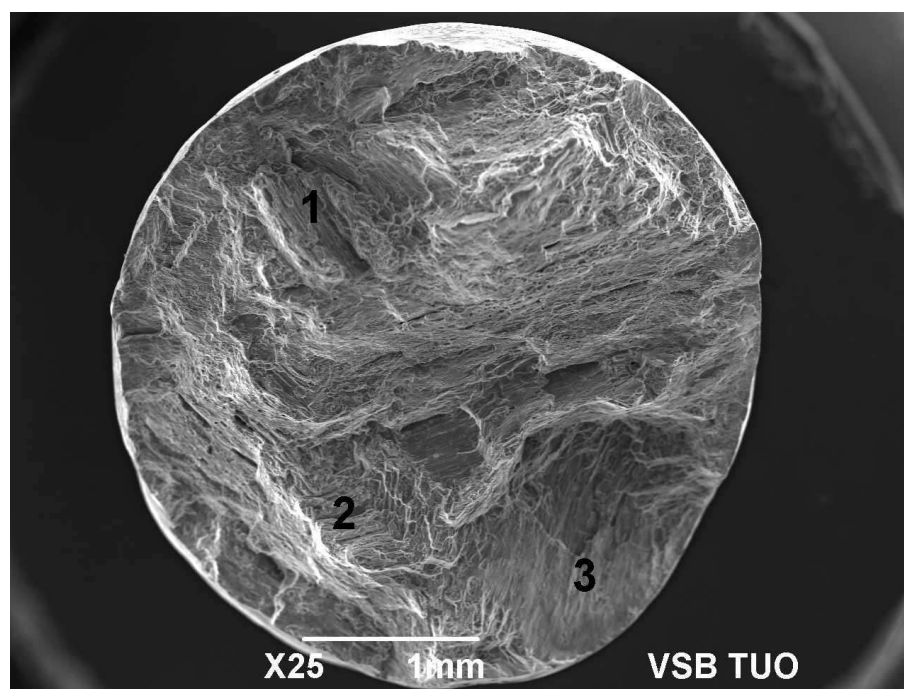


Obr.25. Struktura v oblasti č.1 na lomu.

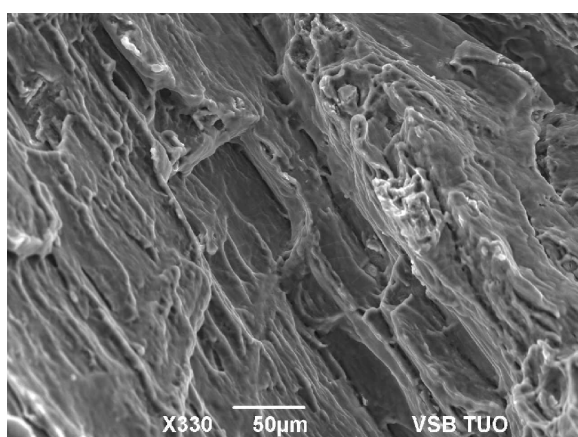


Obr.26. Struktura v oblasti č.2 na lomu.

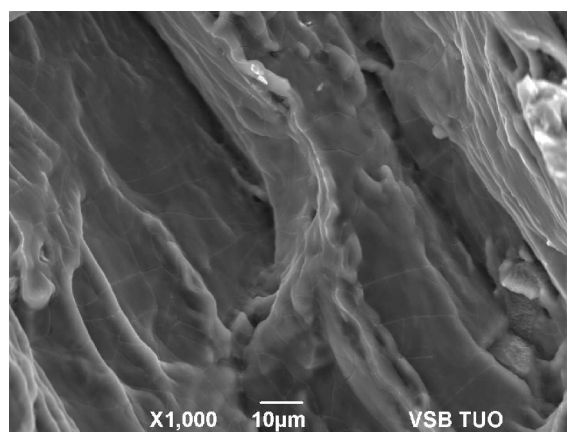
Vzorek č.5. Tahová zkouška provedena při teplotě 101°C.



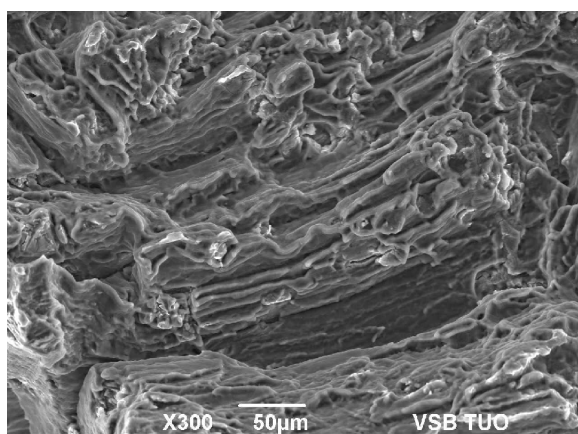
Obr.27. Lomová plocha vzorku č.5.



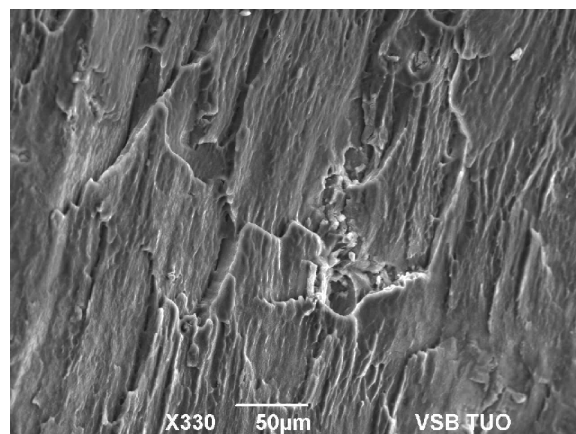
Obr.28. Struktura v oblasti č.1 na lomu.



Obr.29. Struktura v oblasti č.1 na lomu.

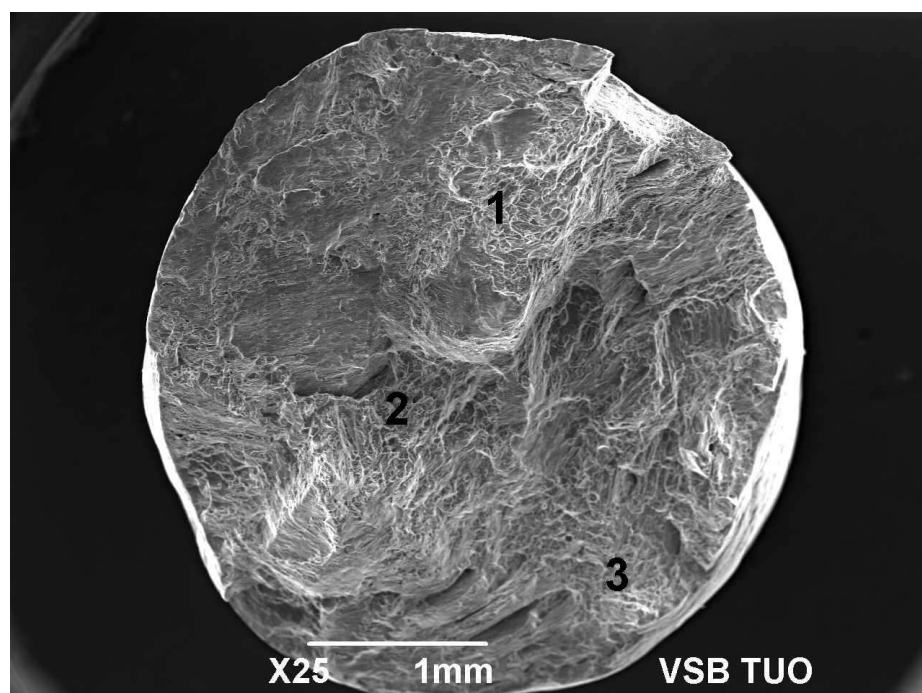


Obr.30. Struktura v oblasti č.2 na lomu.

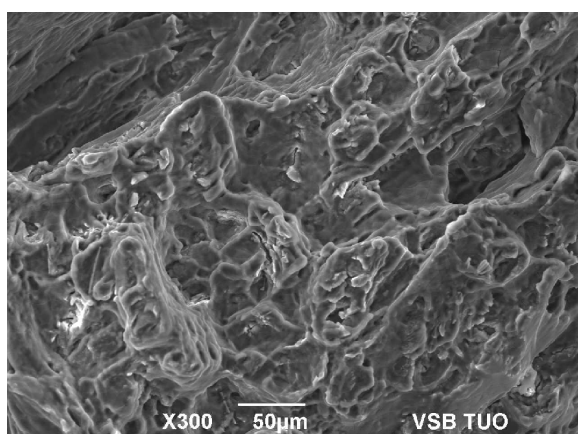


Obr.31. Struktura v oblasti č.3 na lomu.

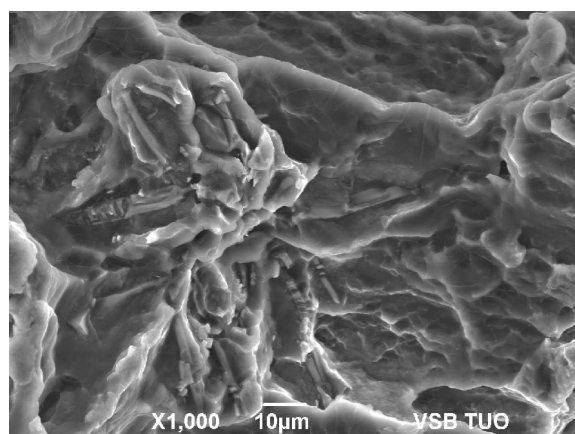
Vzorek č.7. Tahová zkouška provedena při teplotě 152°C.



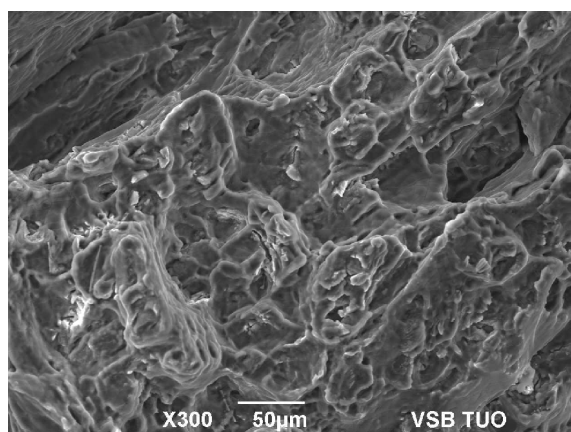
Obr.32. Lomová plocha vzorku č.7.



Obr.33. Struktura v oblasti č.1 na lomu.

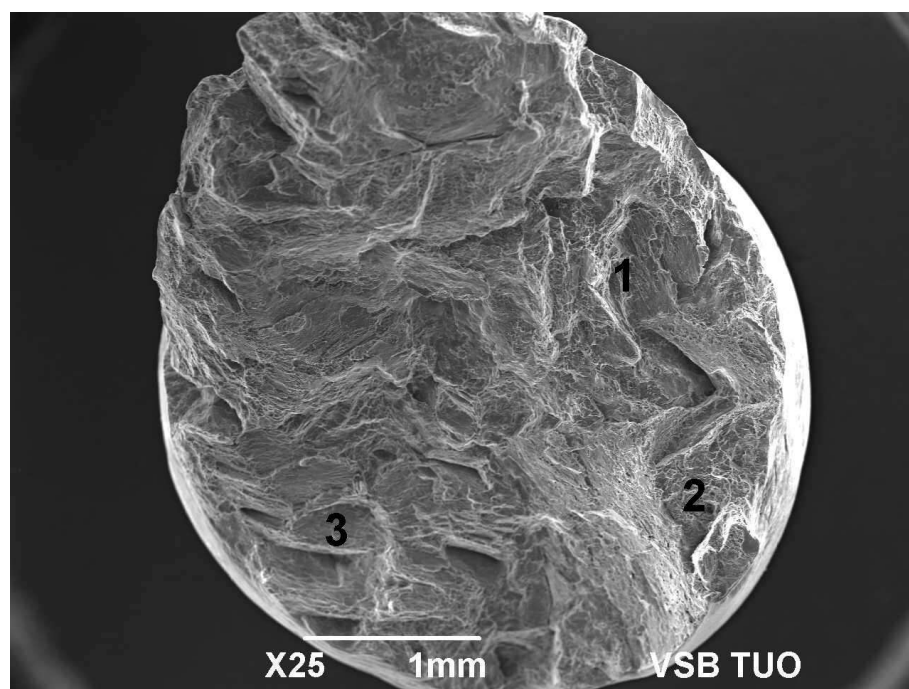


Obr.34. Struktura v oblasti č.2 na lomu.

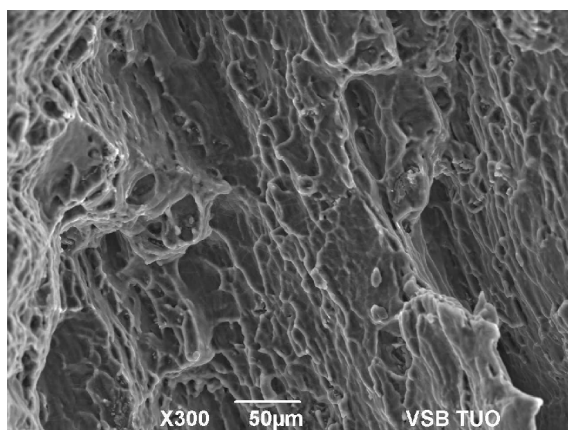


Obr.35. Struktura v oblasti č.3 na lomu,

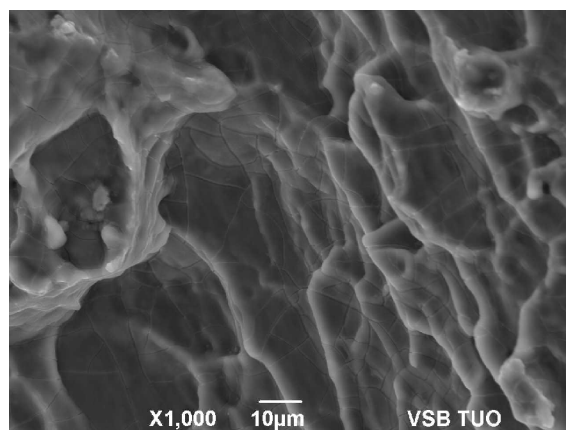
Vzorek č.14. Tahová zkouška provedena při teplotě 199°C.



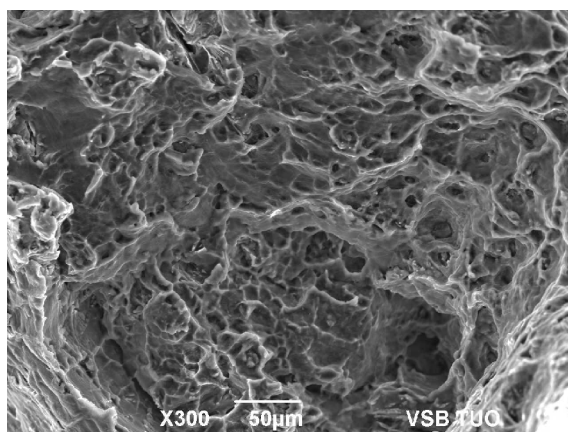
Obr.36. Lomová plocha vzorku č.14.



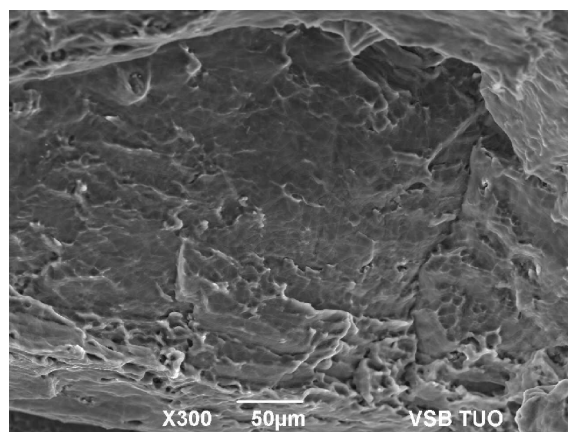
Obr.37. Struktura v oblasti č.1 na lomu.



Obr.38. Struktura v oblasti č.1 na lomu.

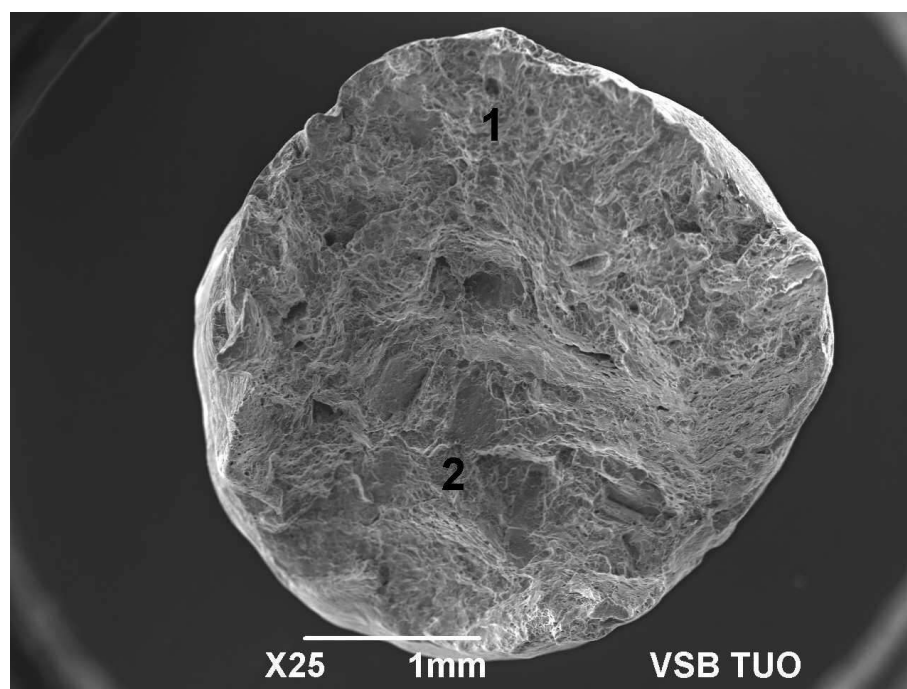


Obr.39. Struktura v oblasti č.2 na lomu.

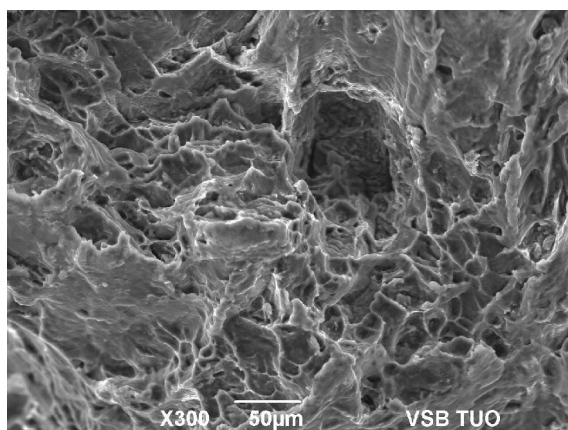


Obr.40. Struktura v oblasti č.3 na lomu.

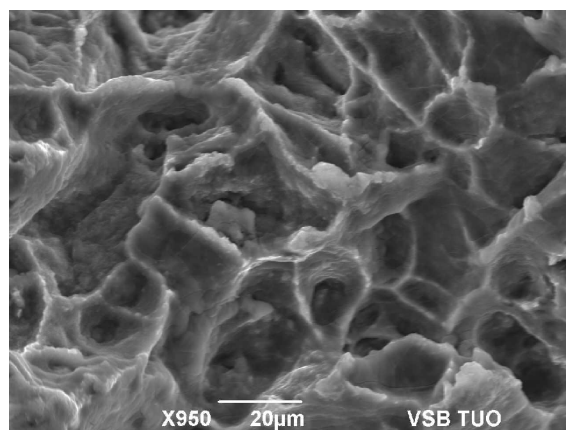
Vzorek č.11. Tahová zkouška provedena při teplotě 250°C.



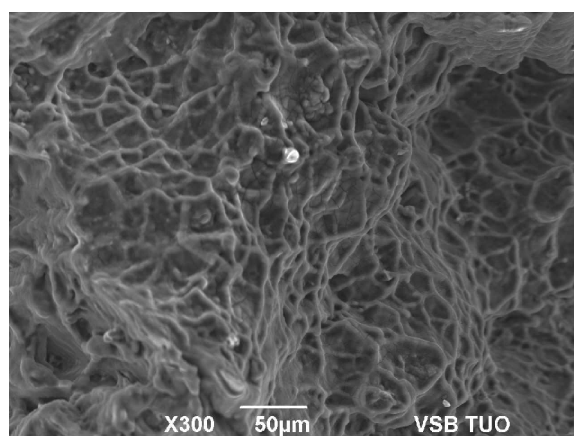
Obr.41. Lomová plocha vzorku č.11.



Obr.42. Struktura v oblasti č.1 na lomu.



Obr.43. Struktura v oblasti č.1 na lomu.



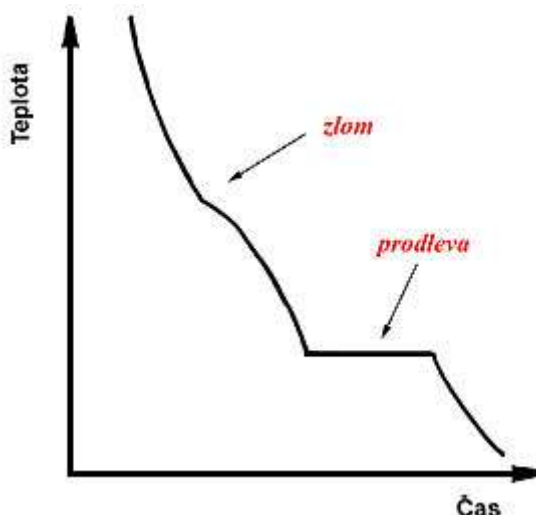
Obr.44. Struktura v oblasti č.2 na lomu

3.1.6. Zhodnocení lomových struktur

- Lomová plocha vzorku č.2. Tahová zkouška provedena při teplotě 19⁰C, (obr.24.-26.) křehké štěpné porušení s výrazným znakem rovnoběžného uspořádání fází.
- Lomová plocha vzorku č.5. Tahová zkouška provedena při teplotě 101⁰C, (obr.28.-31.) obdobná struktura jako u vzorku č.2., křehké štěpné porušení, litá struktura, bílá místa mohou svědčit o existenci oxidů.
- Lomová plocha vzorku č.7. Tahová zkouška provedena při teplotě 152⁰C, (obr.33.-35.) typický houževnatý lom, transkrystalické porušení, vytržené jamky.
- Lomová plocha vzorku č.14. Tahová zkouška provedena při teplotě 199⁰C, (obr.37.-40.) obdobně narušené struktura jako u vzorku č.7.
- Lomová plocha vzorku č.11. Tahová zkouška provedena při teplotě 250⁰C, (obr.42.-44.) narušení struktury je shodného charakteru jako u vzorků č.7. a č.14., tzn. transkrystalické tvárné porušení s jamkovou morfologií.

3.2. Termická analýza

Klasická termická analýza (TA) představuje nejstarší a nejjednodušší metodu používanou pro stanovení teploty tání a tuhnutí u čistých látek, resp. teplot likvidu a dalších charakteristických teplot u slitin či složitějších nekovových soustav. Je založena na registraci uvolňovaného nebo pohlcovaného tepla při fázové přeměně. Měří se teplota systému v závislosti na čase. Probíhající fázové přeměny se na křivkách závislosti $T = f(t)$ projevují typickými anomáliemi. V případě čisté látky, binárního eutektika, resp. peritektika se na křivce projeví izotermická prodleva, počátek a konec krystalizace tuhého roztoku se projeví zlomem, odpovídajícím změně rychlosti ochlazování resp. ohřevu, viz obr.45.

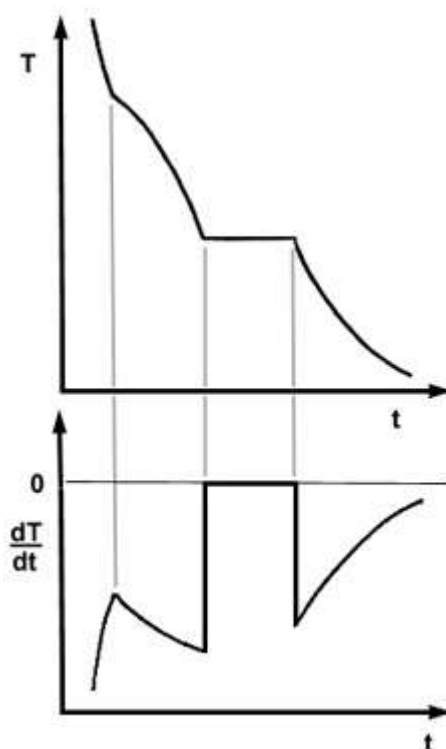


Obr.45. Typické anomálie na ochlazovací křivce

Metoda je vhodná pro sledování krystalizace kovů a slitin, které jsou doprovázeny výrazným tepelným efektem. Nehodí se proto pro sledování fázových přeměn v tuhém stavu, které jsou málo tepelně zabarveny a tato metoda je v takových případech nepříliš citlivá. Křivka ochlazování vynesená v souřadnicích $T = f(t)$ podává nejméně zřetelný obraz přeměn. Proto se často křivky ochlazování vynášejí v jiných souřadnicích, nejčastěji

$$dT/dt = f(t), T = f(dT/dt) \text{ a } T = f(dt/dT)$$

Na obr.46 je příklad idealizované křivky ochlazování a její časové derivace. V běžné slévárenské praxi se klasická termická analýza pro svoji jednoduchost a rychlost například používá k průběžné kontrole stavu tavenin (očkování, modifikace) před odléváním.



Obr.46. Křivka ochlazování a její derivace

3.2.1. Příprava termočláunku pro měření

Pro potřeby experimentu byl zvolen termočlánek NiCr10 (niklchrom) – Ni (obr.47.). Tento typ termočláunku je nejčastěji používaným typem v průmyslu vůbec. Je levný, produkuje relativně vysoké termoelektrické napětí, a proto je možné použití méně citlivých přístrojů pro jeho měření, což byla v případě tohoto experimentu velmi vítaná přednost.

Samotná příprava termočláunku spočívala v protažení dvou vodičů o různé polaritě keramickou dvojkapilárou. Tyto dva vodiče byly poté pomocí svařovačky (obr.48.) na jednom konci spojeny. Následně byly termočláanky připevněny k měřicí aparatuře a zapuštěny do jednotlivých kelímků, kde snímaly teplotu ve vzdálenosti 1 cm ode dna kelímku.



Obr.47. Termočlánek zhotovený pro účely experimentu



Obr.48. Svářečka na níž byly zhotoveny spoje vodičů termočládku

3.2.2. Provedení termické analýzy

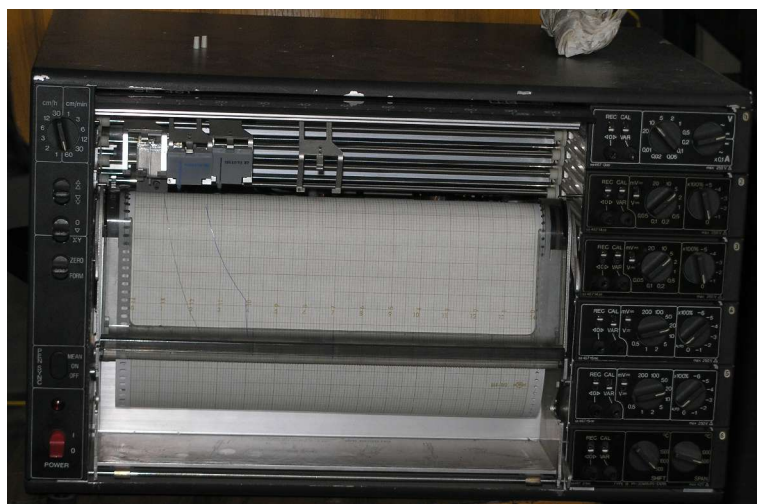
Pro měření termické analýzy byly k dispozici vzorky celkem tří různých materiálů, jmenovitě čistý hořčík, slitina AZ91 a slitina AM60. Tyto vzorky byly postupně roztaveny v elektrické odporové peci (obr.49.) a odlévány do zkušebních kelímků, ve kterých byly zapuštěny termočládky. První termočlánek měl za úkol zaznamenat teplotu ve středu kelímku a druhý teplotu u jeho stěny (obr.50.). Roztavený kov a slitiny byly odlévány do následujících kelímků, litinového, grafitového a monalitového. Ovšem hned po prvním odlití se monalitový kelímek ukázal jako zcela nevhodný, neboť začal z roztaveným čistým hořčíkem reagovat a došlo dokonce k jeho hoření. Z tohoto důvodu nebyl v dalším průběhu experimentu použit. Lití do litinového a grafitového kelímku se obešlo bez podobných problémů. Průběh ochlazování kovu a slitin byl zaznamenáván na lineárním zapisovacím přístroji (obr.51.), jenž vykresloval průběh na milimetrový papír. Během celého experimentu byly dodržovány všechny známé zásady pro tavení vysoce reaktivního hořčíku, tzn. tavenina byla zasypávána sírou tak, aby nedošlo k jejímu hoření.



Obr.49. Elektrická odporová pec



Obr.50. Měřící aparatura s kelímky
do nichž byly připevněny
termočlánky



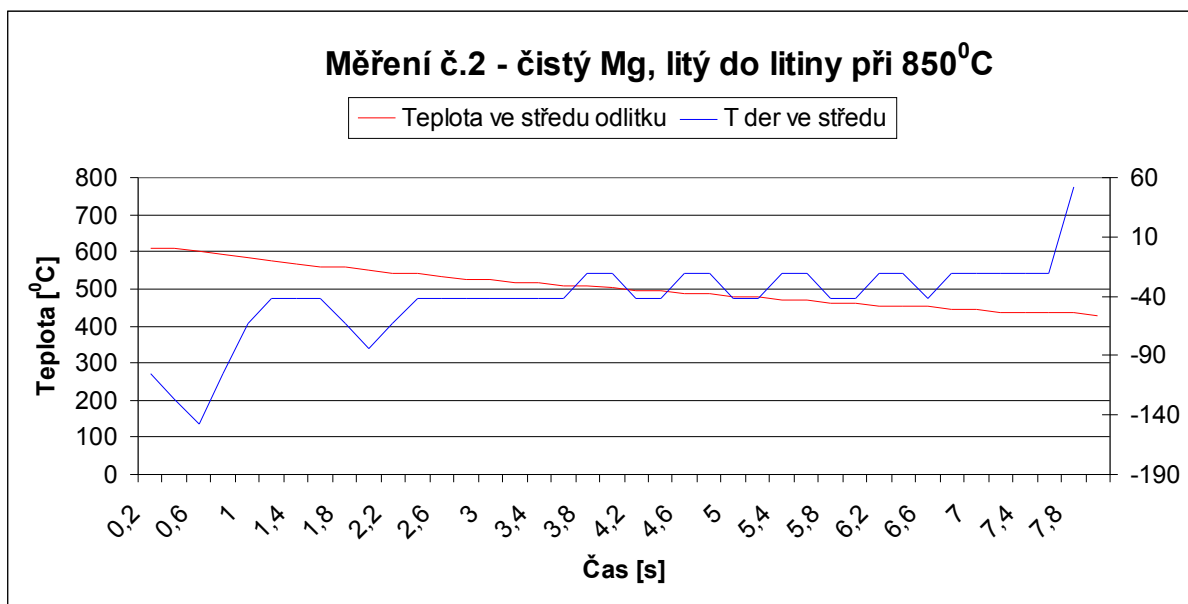
Obr.51. Lineární zapisovací přístroj

Tab.11. Chemické složení zkoušených slitin.

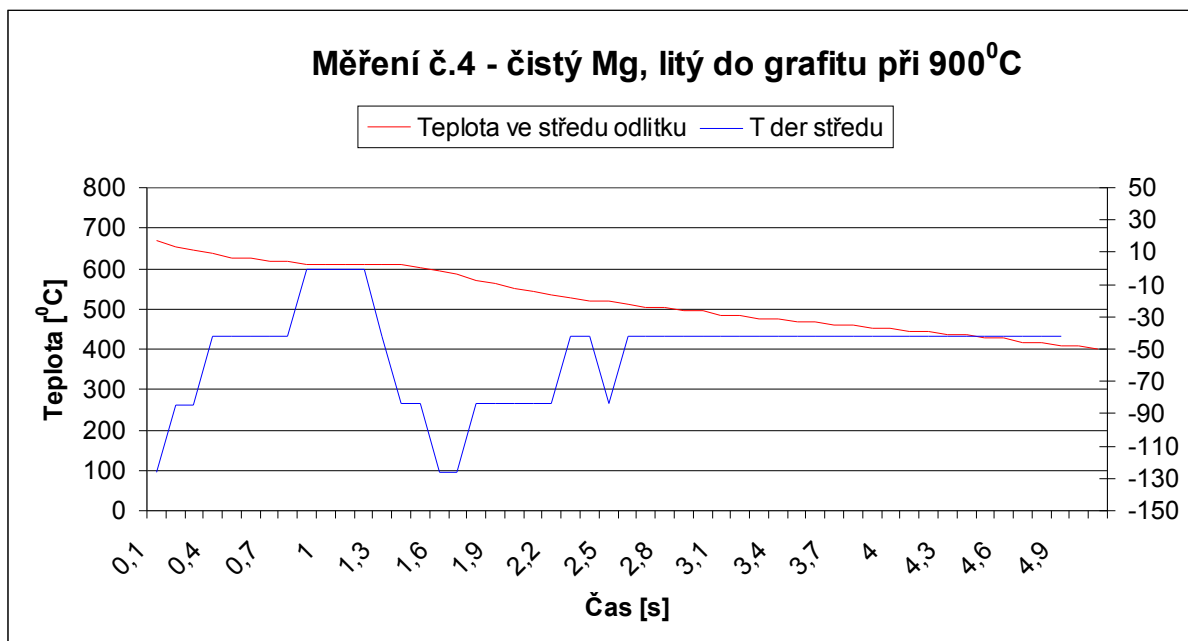
Slitina	Obsah prvků ve slitině [%]								
	Zn	Al	Si	Cu	Mn	Fe	Ni	Be	Ostatní
AM60	0,09	6,0	0,03	0,001	0,29	0,003	0,001	0,0008	< 0,01
AZ91	0,56	8,8	0,06	0,004	0,20	0,004	0,001	0,0007	< 0,01

3.2.3. Vyhodnocení výsledků termické analýzy, grafické znázornění křivek ochlazování.

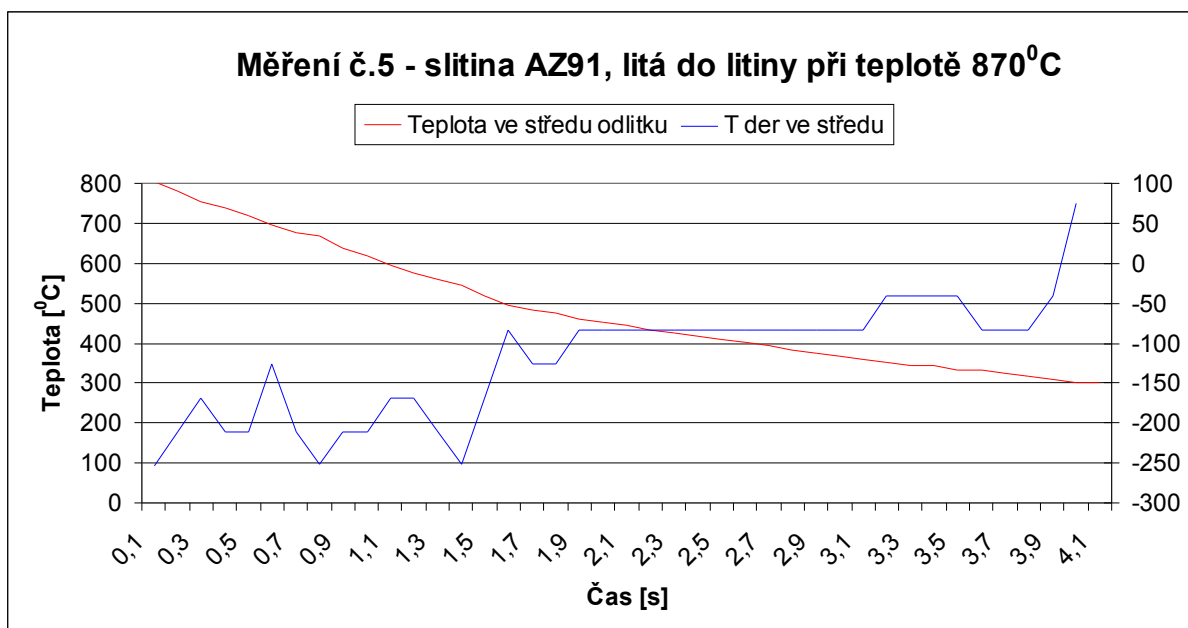
Všechny získané výsledky z měřicího přístroje bylo nutné vyhodnotit a převést z jednotek [mV] pomocí tabulek firmy Omega Engineering na jednotky [$^{\circ}\text{C}$]. Z těchto hodnot byly poté sestaveny křivky ochlazování.



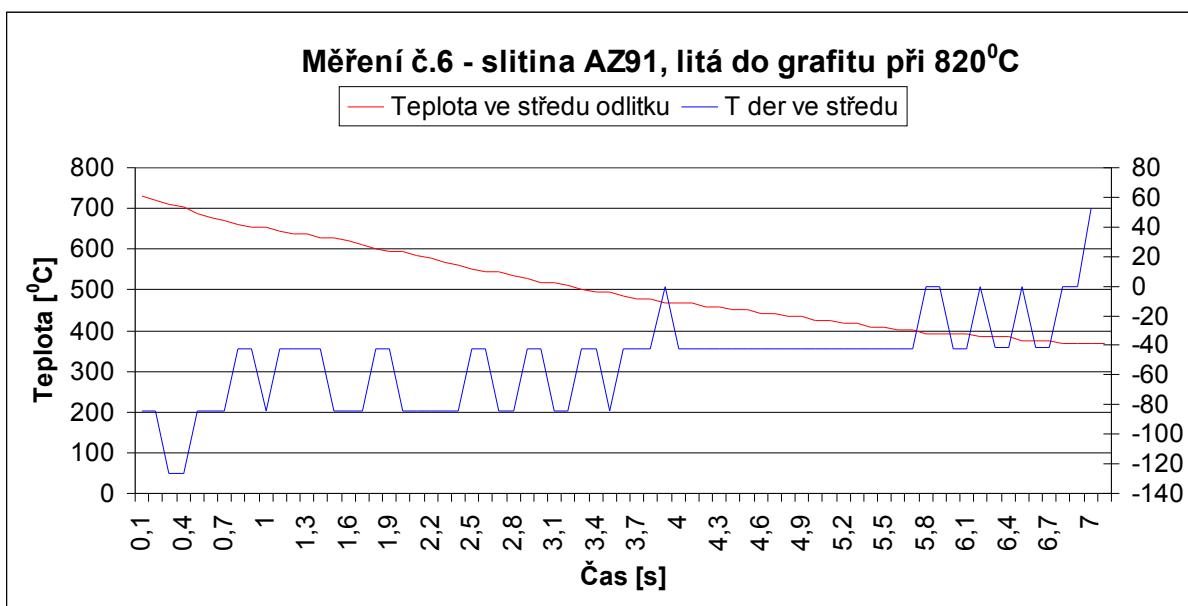
Obr.52. Grafická závislost teploty a teplotní derivace na čase čistého hořčíku litého do litiny.



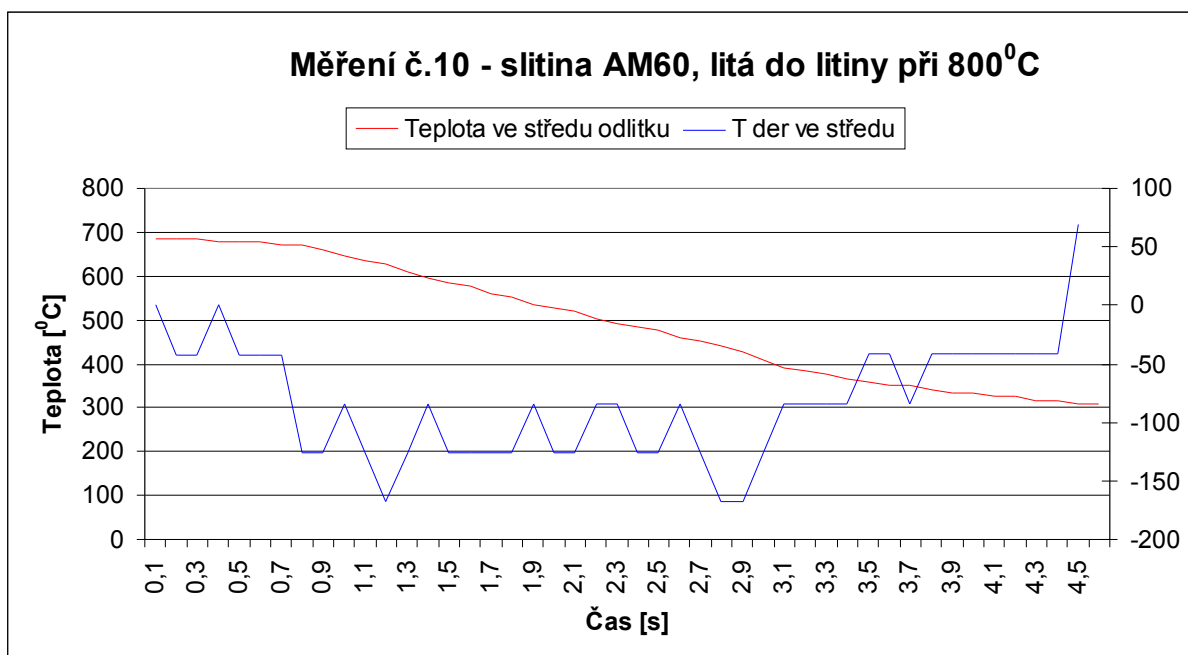
Obr.53. Grafická závislost teploty a teplotní derivace na čase čistého hořčíku litého do grafitu.



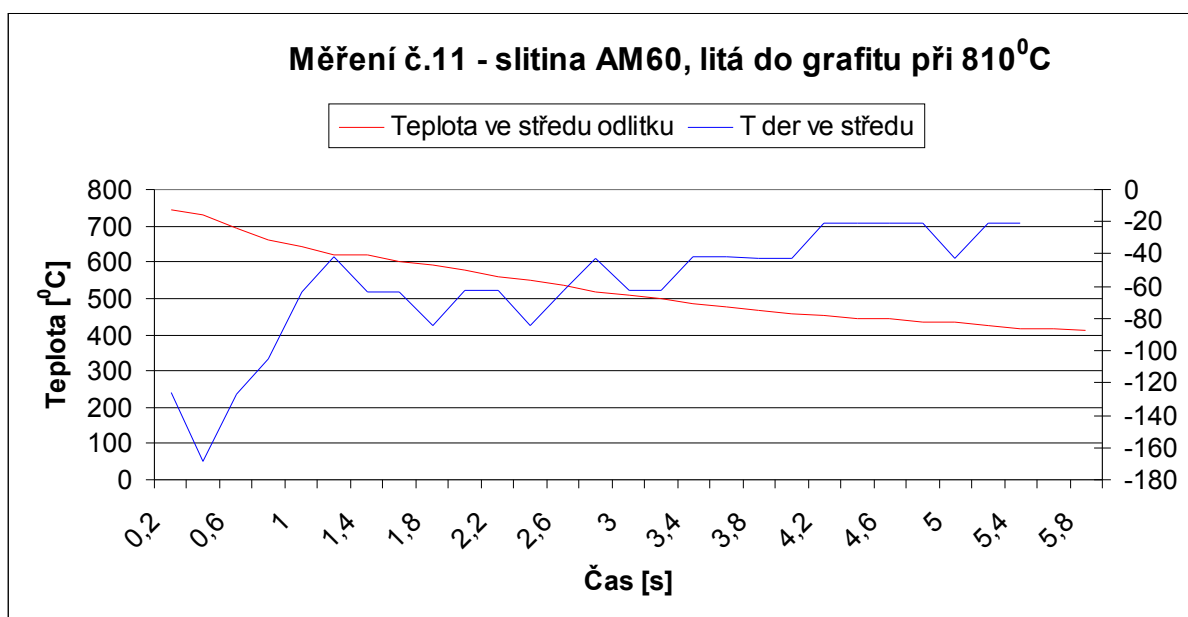
Obr.54. Grafická závislost teploty a teplotní derivace na čase slitiny AZ91 lité do litiny.



Obr.55. Grafická závislost teploty a teplotní derivace na čase slitiny AZ91 lité do grafitu.



Obr.56. Grafická závislost teploty a teplotní derivace na čase slitiny AM60 lité do litiny.



Obr.57. Grafická závislost teploty a teplotní derivace na čase slitiny AM60 lité do grafitu.

3.2.4. Diskuse dosažených výsledků termické analýzy

Naměřené a vypočtené hodnoty z provedené termické analýzy jsem porovnával s hodnotami plynoucími z binárních diagramů hořčík – hliník, hořčík – zinek a hořčík – mangan, neboť tyto prvky jsou obsaženy ve zkoušených slitinách a jejich procentuální obsah významně ovlivňuje výši teplot likvidu a solidu u těchto slitin.

V průběhu jednotlivých zkoušek byly vždy použity dva termočlánky, z nichž jeden měřil teplotu ve středu odlitku a druhý teplotu u jeho stěny. Do grafického znázornění křivek ochlazování jsem zanesl pouze hodnoty naměřené ve středu kelímku, protože hodnoty plynoucí z měření u stěny byly příliš nízké vlivem vysoké rychlosti ochlazování stěny kelímku a tudíž tyto hodnoty byly neprokazatelné.

Při porovnávání získaných hodnot z lití provedených do jednotlivých kelímků je patrné, že kelímek z grafitu ochlazoval měřenou taveninu pomaleji než kelímek z litiny a vzhledem k této skutečnosti jsou výsledky z grafitového kelímku mnohem průkaznější než z kelímku litinového, v němž bylo ochlazování příliš rychlé. Znamená to tedy potvrzení nižšího ochlazovacího účinku grafitu ve srovnání s litinou.

Při porovnání naměřených teplot s teplotami teoretickými jsem dospěl k těmto závěrům:

- Čistý Mg (99,9%) – teplota tání je 650°C . Výsledná teplota tání mého měření je 610°C . Vzniklý rozdíl mezi teoretickou a naměřenou hodnotou mohl být zapříčiněn skutečností, že se jednalo o první dvě měření, ve kterých byl kov odléván do studených kelímků, což mohlo být ve výsledku příčinou jejich výraznějšího ochlazovacího účinku, nebo také nepřesností na lineárním měřicím přístroji.
- Slitina AM60 – teplota likvidu asi 610°C , teplota solidu přibližně 530°C . Výsledky měření slitiny AM60 se výrazně přibližují teoretickým hodnotám. V případě posouzení výsledků grafitového kelímku lze konstatovat, že teoretické hodnoty jsou shodné s naměřenými. Nutno poznamenat pěkné kopírování formy při vytloukání odlitku.
- Slitina AZ91 – teplota likvidu odečtená z binárních diagramů je přibližně 600°C a teplota solidu 470°C . Při porovnání naměřených výsledků u slitiny AZ91 se pohybujeme asi o 50°C výše oproti teoretické hodnotě teploty likvidu. Teplota solidu u grafitového kelímku se dá považovat za potvrzení teoretického předpokladu. Zaznamenaný rozdíl teplot likvidu přisuzuji skutečnosti, že měření slitiny AZ91

proběhlo jako poslední v rámci celého experimentu a tudíž kelímky, do nichž byla roztavená slitina odlévána, nebyly dostatečně ochlazeny po předchozích litích.

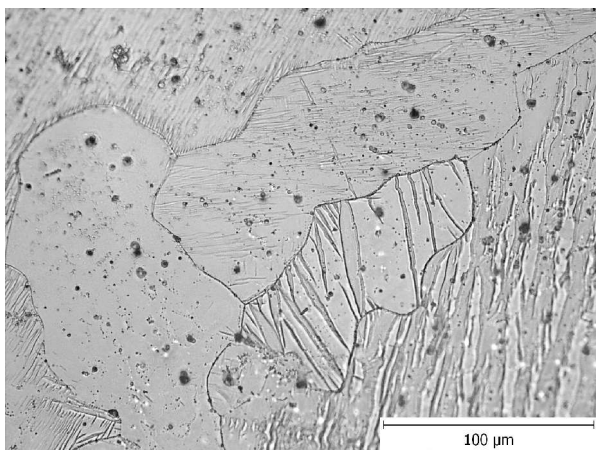
Závěrem bych poznamenal, že k přesnějším výsledům měření by mohlo přispět použití originálních termočlánků. Tento krok ovšem znamená výraznější finanční navýšení celého experimentu.

3.2.5. Provedení metalografických zkoušek

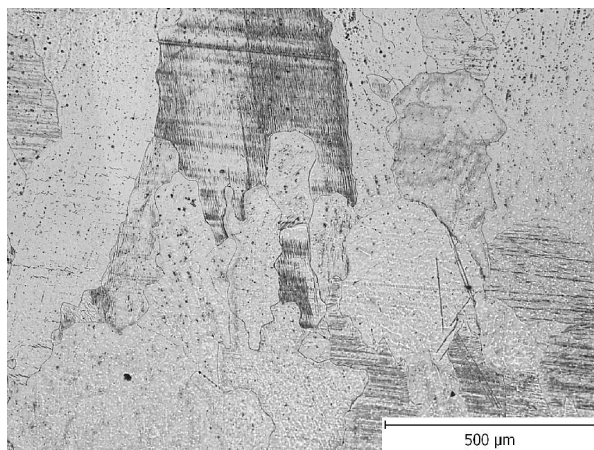
Na vzorcích odlitých během termické analýzy byly následně provedeny metalografické zkoušky za účelem zjištění jejich struktury.

Příprava vzorků

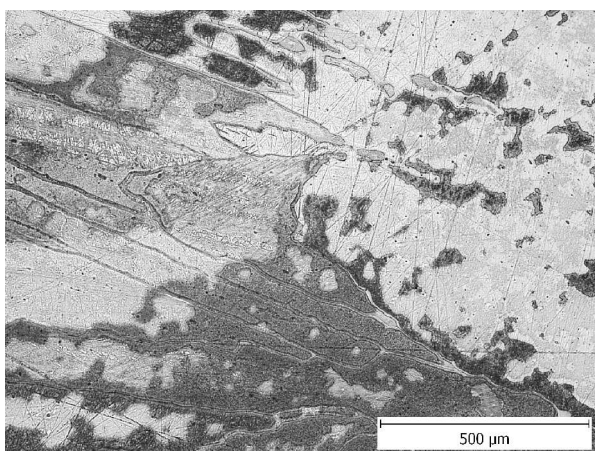
Jednotlivé vzorky byly nařezány ve vzdálenosti 1cm od spodní části odlitku. Zkušební plocha vzorků musela být poté povrchově upravena tak, aby bylo možné pomocí mikroskopu rozeznat jednotlivé složky struktury. Vzorky byly broušeny na kotoučové brusce chlazené vodou. Při broušení byly použity brusné papíry na bázi karbidu křemíku o drsnosti 60, 120, 320, 500, 600, 800 a 1200. Po dokonalém vybroušení byla upravená plocha ošetřena lihem, pak následovalo leštění na leštícím suknu za použití 1% roztoku Al_2O_3 . Konečnou úpravu zkušební plochy představovalo její naleptání, což spočívalo v ponoření vzorku do leptacího činidla, kterým byl 1% roztok HNO_3 . Leptání je proces, při kterém dochází ke zviditelnění jednotlivých strukturních součástí. Struktura kovového materiálu je totiž po mechanickém broušení a leštění zakryta tvářenou B-vrstvou. Abychom mohli strukturu pozorovat, je třeba tuto vrstvu chemicky odstranit.



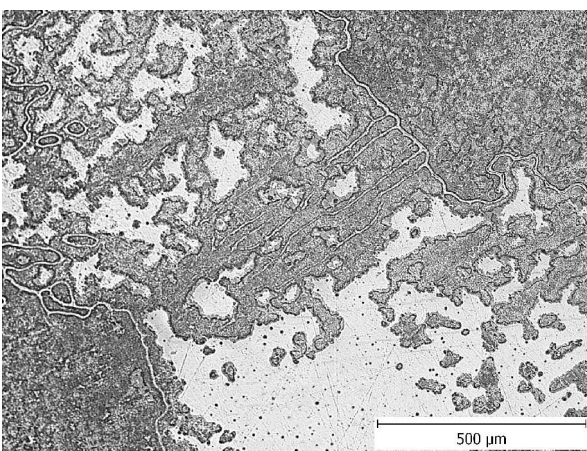
Obr.58. Čistý Mg litý do grafitu,



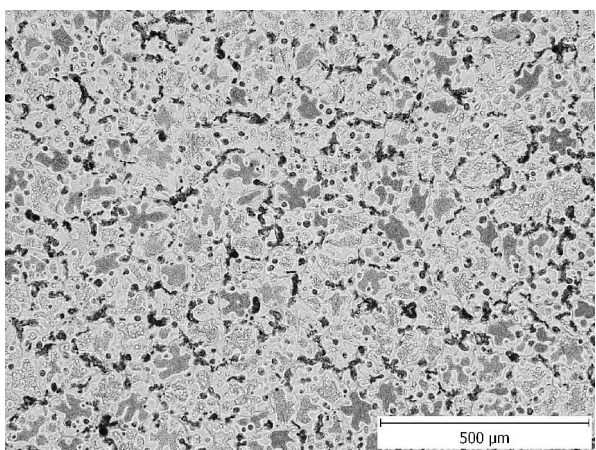
Obr.59. Čistý Mg litý do grafitu,



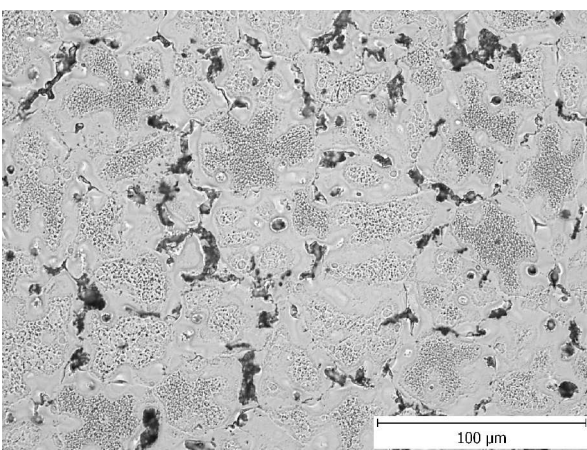
Obr.60. Čistý Mg litý do litiny,



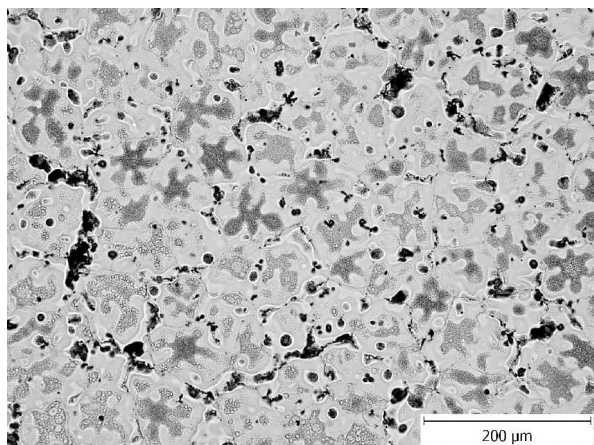
Obr.61. Čistý Mg litý do litiny,



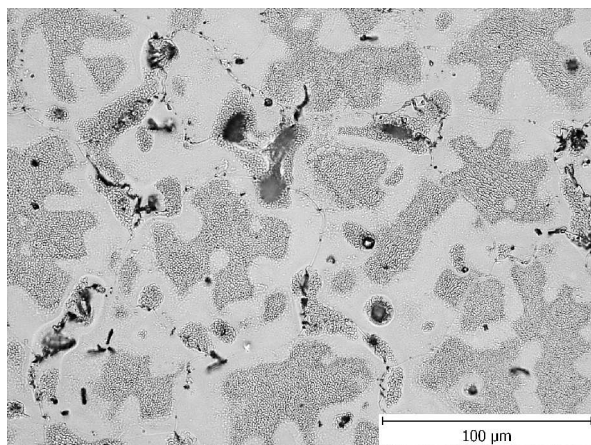
Obr.62. Slitina AM60 litá do litiny,



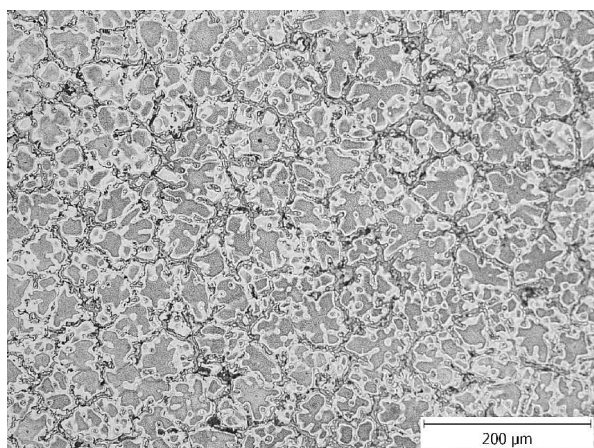
Obr.63. Slitina AM60 litá do litiny,



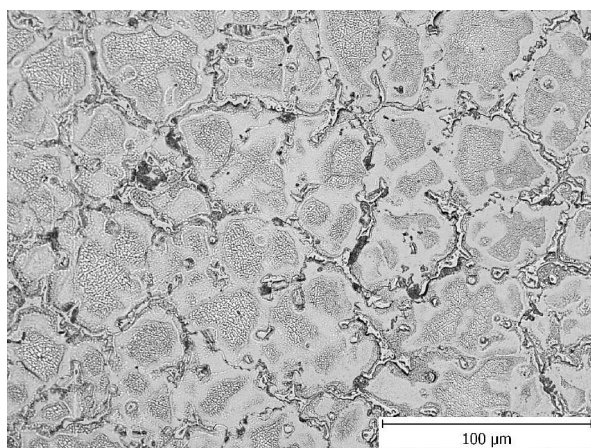
Obr.64. Slitina AM60 litá do grafitu,



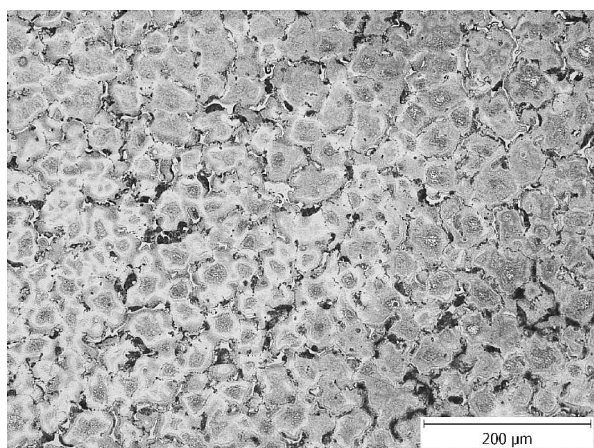
Obr.65. Slitina AM60 litá do grafitu,



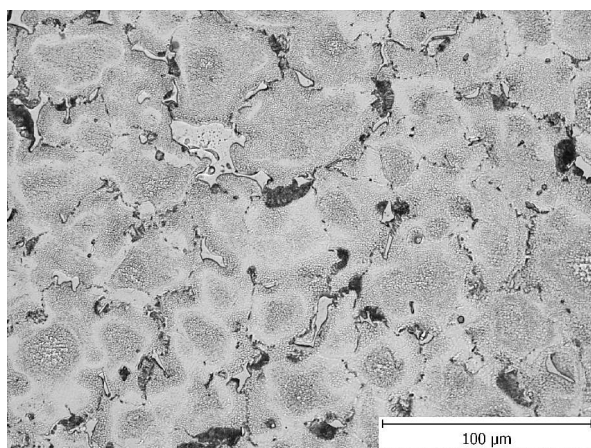
Obr.66. Slitina AZ91 litá do litiny,



Obr.67. Slitina AZ91 litá do litiny,



Obr.68. Slitina AZ91 litá do grafitu,



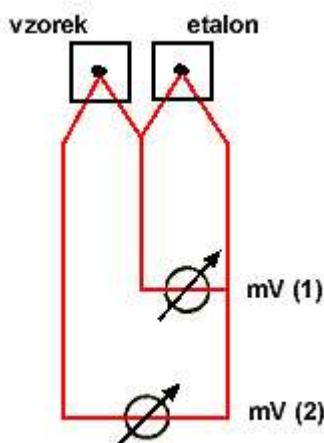
Obr.69. Slitina AZ91 litá do grafitu,

3.2.6. Zhodnocení struktur

- Čistý Mg - litý do grafitu,
(obr.58.-59.) dobře viditelné hranice zrn, ve kterých je možno sledovat rovnoběžky přes zrna, což je charakteristická vlastnost související se strukturou kovu. Dále je vidět přítomnost vměstků. Výskyt kruhových útvarů ve struktuře může být projev naplynění.
- Čistý Mg – litý do litiny,
(obr.60-61.) specifická struktura, snímky by měly být předmětem dalšího zkoumání (např. metodou barevné metalografie).
- Slitina AM60,
(obr.62.-65.) viditelný vyloučený tuhý roztok a řediny, na hranicích zrn viditelná vyloučená fáze β ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$). Nehomogenita tuhého roztoku.
- Slitina AZ91,
(obr.66.-69.) obdobný průběh struktury jako u slitiny AM60.

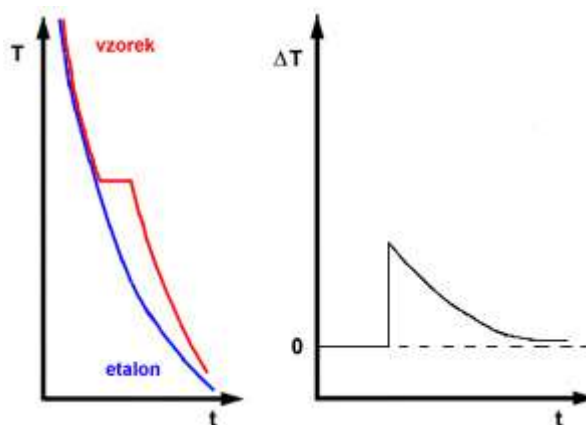
3.3. Diferenční termická analýza

Diferenční termická analýza (DTA) je založena na měření rozdílu teplot zkoumaného vzorku a srovnávacího vzorku (etalonu). Základní požadavky kladené na referenční vzorek jsou: inertnost a stabilita (nesmí prodělavat fázovou přeměnu) v měřeném intervalu teplot, etalon a zkoumaný vzorek musí mít co nejpodobnější tepelnou kapacitu a tepelnou vodivost, případně stejnou velikost částic, jsou-li vzorky práškové. Jako etalony se nejčastěji používají Al_2O_3 , MgO a SiO_2 či některé čisté kovy. Rozdíly teplot se registrují současně s teplotou referenčního vzorku jako závislosti $\Delta T = f(T)$, resp. $T = f(\Delta T)$ nebo ve formě časové závislosti $\Delta T = f(t)$. Schéma zapojení termočlánků u DTA je na obr.70. Termoelektrické napětí mV (1) je úměrné teplotě etalonu a napětí mV (2) je úměrné rozdílu teplot.



Obr.70. Schéma zapojení termočlánků u DTA

Obr.71. schematicky zachycuje křivky ochlazování etalonu, resp. vzorku a příslušnou časovou závislost rozdílu teplot těchto materiálů.



Obr.71. Odvození průběhu křivek DTA

Polohy extrémů na křivkách DTA (maxim nebo minim charakterizujících exoprocesy nebo endoprocesy), umožňují látku nebo aktivní součást vzorku identifikovat a množství uvolněného nebo spotřebovaného tepla dovoluje činit kvantitativní závěry. Tato metoda je ve srovnání s klasickou termickou analýzou mnohem citlivější na probíhající fázové změny a lze ji použít i při studiu fázových přeměn v tuhém stavu.

3.3.1. Vyhodnocení výsledků diferenční termické analýzy

Vzorky pro měření byly připraveny speciálně pro potřeby DTA obráběním ze slitin typu AZ91 a AM60. Chemické složení obou materiálů je zachyceno v tabulce 10.

Po umístění vzorku do pracovního prostoru zařízení SETARAM byl proveden ohřev rychlostí 4°C/min. Z měření byly získány níže uvedené výsledky.

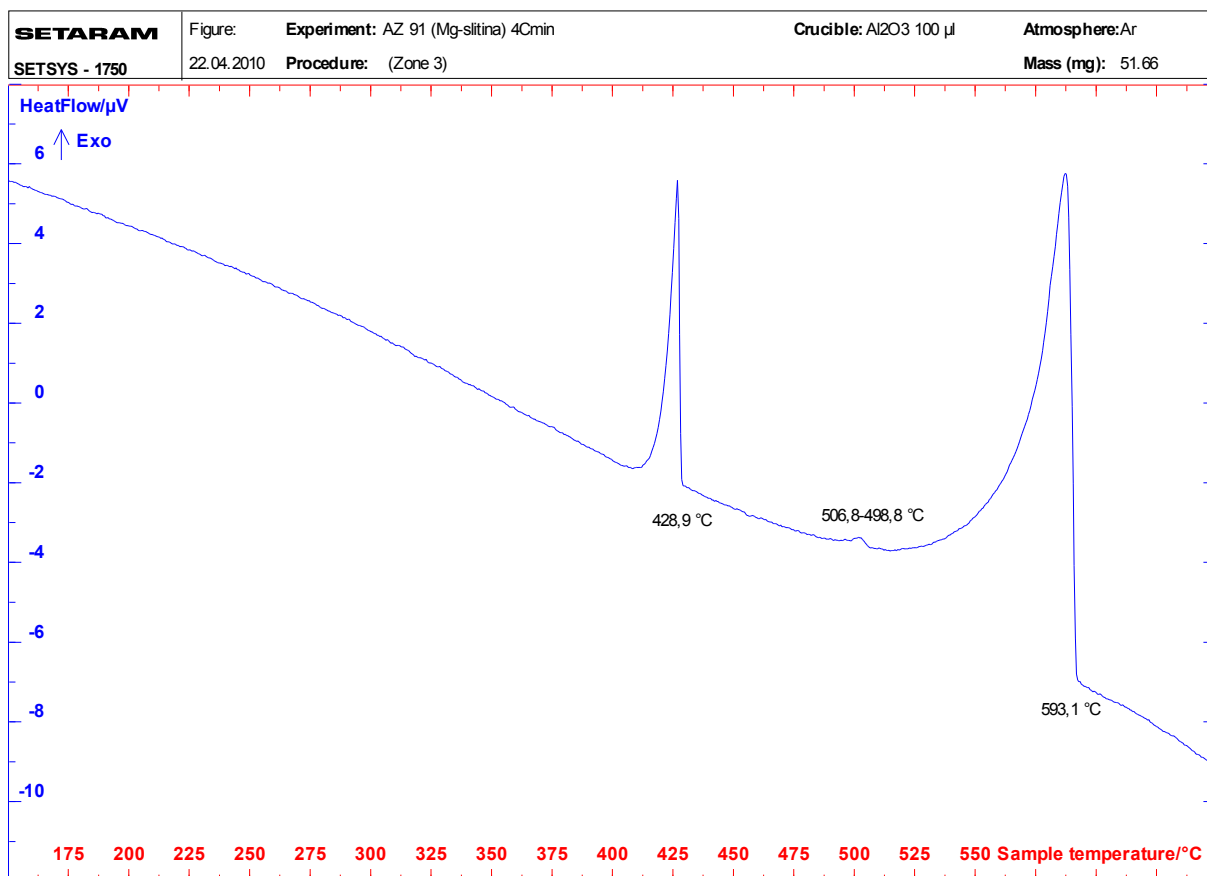
Slitina AZ91

Záznam byl vyhotoven od teploty 150°C při výše zmíněné rychlosti ohřevu. První pík na křivce byl zaznamenán při teplotě 426,7°C, mírné anomálie byly zaznamenány při teplotách 527,3°C, 539°C a při 581,1°C. Maximálně hluboké minimum na křivce bylo zaregistrováno při teplotě 595°C. Pro tentýž vzorek byla zaznamenána křivka pro ochlazování ve stejné stupnici na ose x – teplota vzorku (obr.72.). Z grafu je patrné, že kontinuita a plynulost křivky je narušena (shora) při teplotě 593,1°C, při teplotách 506,8 – 498,8°C se vyskytují velmi nevýrazná narušení plynulosti křivky, výrazný pík nastává při 428,9°C. Při ohřevu, ale zejména při ochlazování je nutno počítat s určitým posunutím významných teplot, při ochlazování k nižším teplotám.

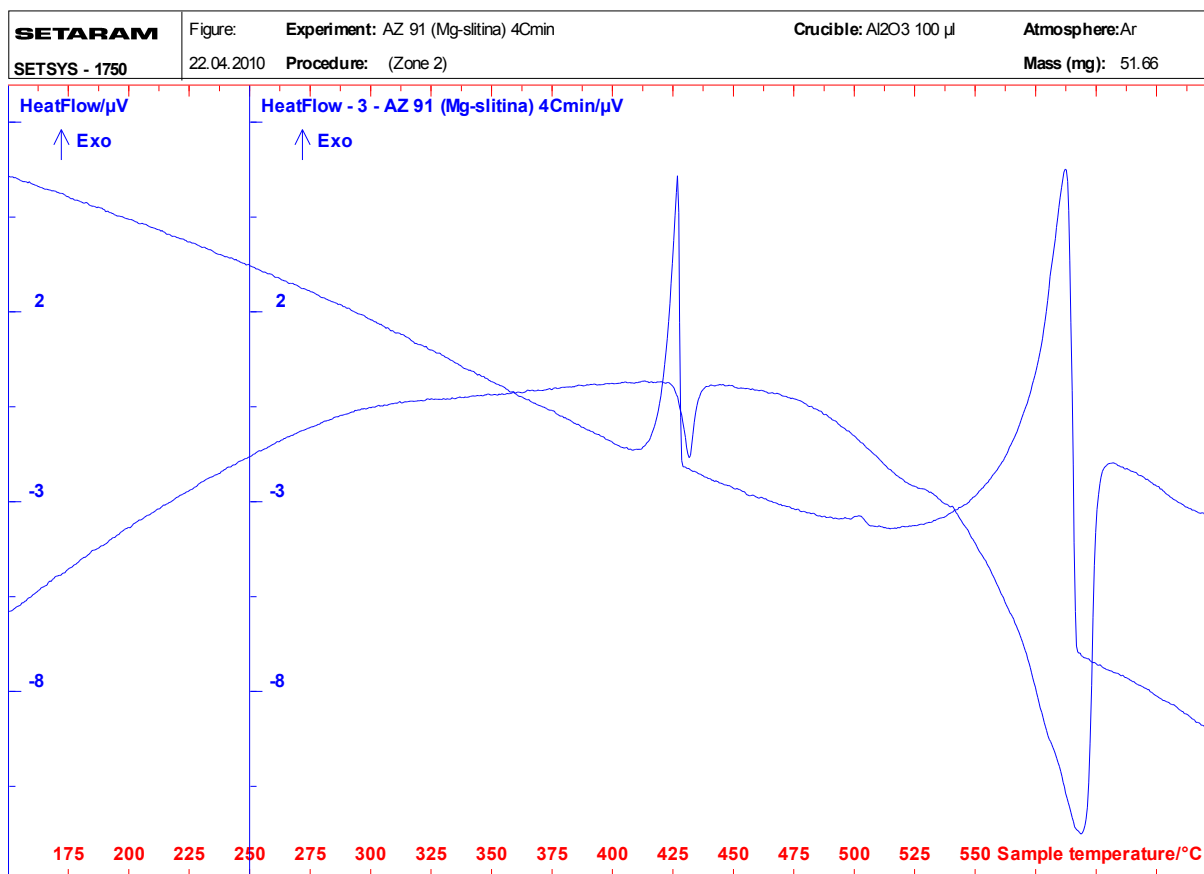
Výrazné píky jsou označeny teplotami 595°C při ohřevu, 593,1°C při ochlazování, a dále 426,7°C při ohřevu a 428,9°C při ochlazování.

Je vhodné poznamenat, že planimetrováním a stanovením ploch lze s určitou přesností zjistit příslušnou hodnotu exotermického nebo endotermického efektu. Oba záznamy jsou na obr.73.

Rovnovážný diagram Mg-Al vykazuje při teplotě 437°C eutektickou teplotu, kdy je v rovnováze tavenina – tuhý roztok α (se strany hořčíku) s fází $Mg_{17}Al_{12}$. Lze předpokládat, že registrované teploty je nutno spojit s eutektickou teplotou. Přesnější identifikace vyžaduje provedení většího počtu měření.



Obr.72. Slitina AZ91, ochlazování.

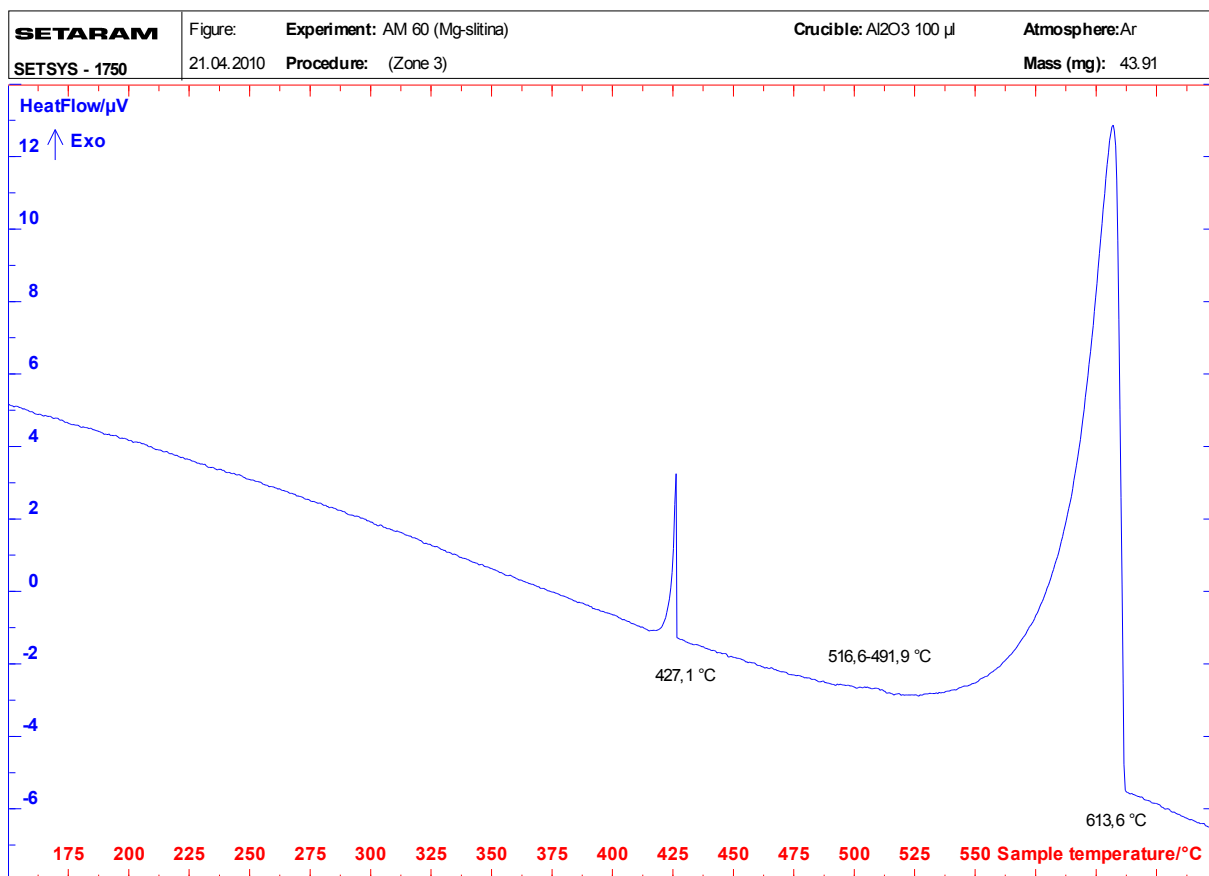


Obr.73. Slitina AZ91, ohřev a ochlazování.

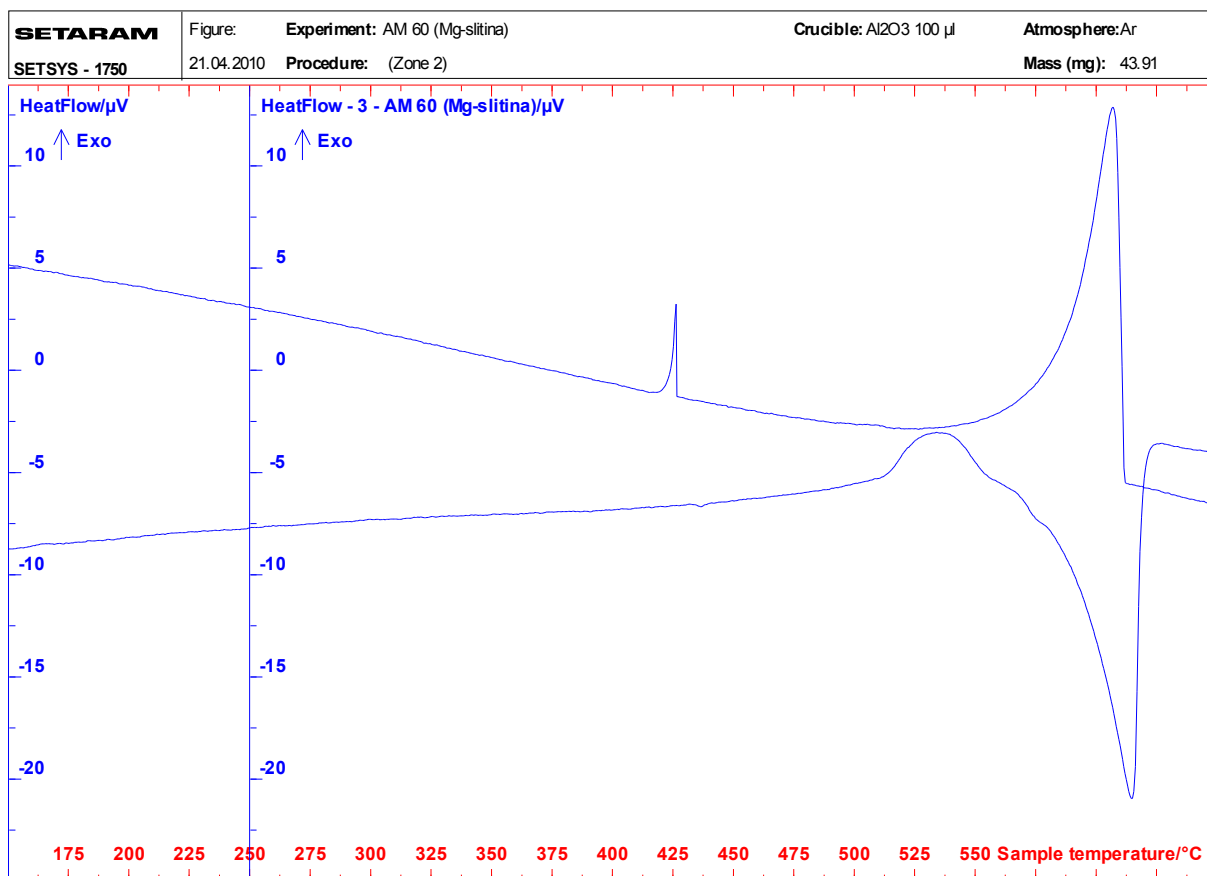
Slitina AM60

I v tomto případě bylo provedeno měření při ohřevu a ochlazování – viz.obr.75. Při ohřevu bylo zaznamenáno malé porušení plynulosti křivky při teplotě 434,5°C, na křivce jsou patrné nepravidelnosti při teplotách 557°C a 576,6°C, maximální pík byl zaznamenán při teplotě 616,4°C.

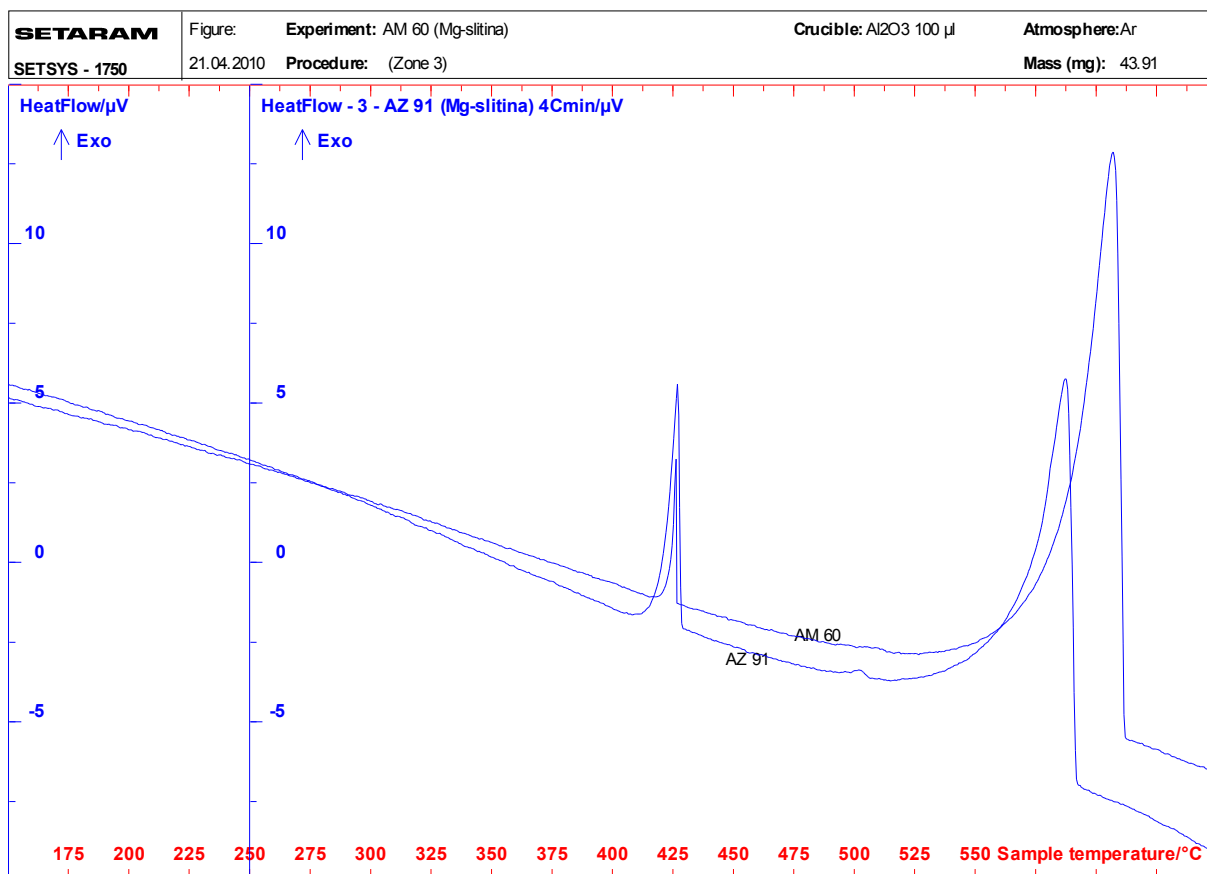
Při ochlazování byly zjištěny teploty (shora) – 613,6°C, drobné narušení plynulosti v intervalu 516,6°C až 491,7°C, výrazný nízký pík byly zaznamenán při teplotě 427,1°C (obr.74.).



Obr.74. Slitina AM60, ochlazování.



Obr.75. Slitina AM60, Ohřev a ochlazování.



Obr.76. Srovnání slitiny AM60 a AZ91 při ochlazování.

3.3.2. Diskuse dosažených výsledků diferenční termické analýzy.

Lze předpokládat, že výrazné píky odpovídají teplotám tavení – teplota likvidu (AZ91 – 593,1°C, AM60 – 613,6°C), píky při nižších teplotách zřejmě odpovídají teplotě eutektika 437°C podle rovnovážného diagramu hořčík-hliník, který je nutno považovat za základní podklad pro posuzování vzájemné souvislosti mezi naměřenými výsledky a příslušnou existencí přítomných fází. Obě křivky na jednou zachycuje obr.76.

K upřesnění a potvrzení zjištěných skutečností je nutno provést další experimentální práce a výsledky podrobit důkladné analýze.

4. Závěr

Po provedení a vyhodnocení tahových zkoušek probíhajících za různých teplot na zkoušených vzorcích vyplynuly tyto závěry,

- nejvyšší hodnoty pevnosti v tahu byly zjištěny v rozmezí teplot 80-100°C,
- po dosažení nejvyšších pevnostních hodnot dochází s dalším teplotním růstem k výraznému pevnostnímu poklesu,
- výjimku představuje vzorek č.7, u něhož je pevnost v tahu takřka 170MPa při teplotě 150°C. Zde bych doporučil provést nová měření, vyloučit chybu a potvrdit anomálii,
- lomové plochy jednotlivých vzorků byly při teplotě do 150°C shodně charakterizovány křehkým porušením, zatímco při vyšších teplotách byl rozeznán lom tvárný.

Provedení termické analýzy za účelem zjištění kritických teplot ochlazování (likvidus, solidus) nepotvrdilo oproti předpokladům teoretické hodnoty. Výjimkou byla pouze slitina AM60 odlévaná do grafitu. K úspěšnějšímu závěru experimentu by bylo zapotřebí použití digitálního měřicího zařízení, které je schopno zaznamenávat podstatně větší množství hodnot v kratším čase.

Vzorky slitin AZ91 a AM60 byly na závěr podrobeny zkoušce diferenční termické analýzy, která potvrdila předpokládané teoretické hodnoty teplot tavení (likvidu) zkoušených slitin.

Všechny výsledky a závěry plynoucí z provedených experimentů je potřeba považovat za zcela jedinečné. Zejména provedení termické analýzy u hořčíkových slitin bylo pravděpodobně vůbec prvním podobným měřením této skupiny slitin uskutečněným v prostorách VŠB-TU Ostrava. Zřejmě i z ohledem na tuto skutečnost nebylo dosaženo takových výsledků, jaké byly dle teoretických znalostí předpokládány.

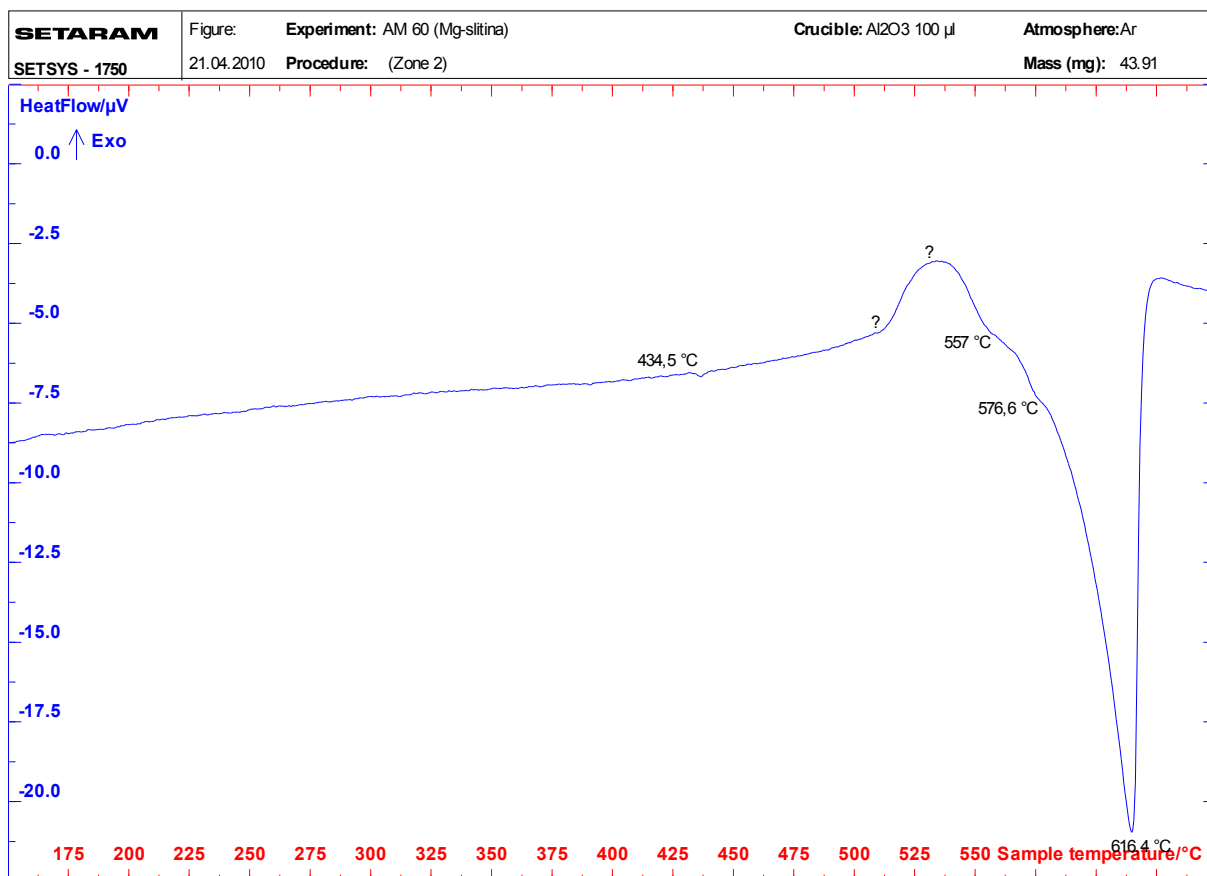
Během těchto měření se prokázalo, že hořčík je velmi problematický prvek a na jeho zkoumání je zapotřebí profesionálnějšího vybavení. I přesto soudím, že tato práce může být odrazovým můstkem pro další experimentální práci v oblasti zkoumání hořčíkových slitin.

5. Seznam použité literatury

- [1] Drápala, J. - Kuchař, L. - Tomášek, K. - Trojanová Z.: Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík – příměs, VŠB - TU Ostrava, 2004
- [2] Roučka, J.: Metalurgie neželezných slitin, VUT Brno, 2004
- [3] Havlíček, F.: Teorie Slévárenství, VŠB - TU Ostrava, 1992
- [4] Čížek, L.: Praktikum zkoušení kovů I., VŠB - TU Ostrava, 1983
- [5] www.minerals.usgs.gov
- [6] Ustohal, V. - Ptáček, L.: Hořčíkové slitiny na odlitky, Slévárenství č.2-3, s.103
- [7] POLMEAR, IJ. : Recent Developments in Light Alloys. Met. Trans., č.1, s.37, 1996
- [8] www.fmmi10.vsb.cz
- [9] www.stefanmichna.com
- [10] images.google.cz
- [11] www.mmspektrum.com/clanek/vyhody-pouziti-mg-slitin-v-porovnani-s-ostatnimi-konstrukcnimi-materialy-2
- [12] Norma ČSN ISO 10002 – 5: Zkouška tahem za zvýšených teplot
- [13] www.explat.cz
- [14] Píšek, F. : Nauka o materiálu I/3. Praha : Akademia, 1973
- [15] Čížek, L. – Greger, M. – Jonšta, Z. – Kořený, R.: Neželezné kovy, Hutnické listy, s.71-76, č.6-8, 2002
- [16] Górný, Z.: Odlewnicze stopy metali nieżelaznych. Warszawa : WNT, 1992
- [17] Ptáček, L. - Janová, D. - Juříčka, I.: In: Sborník IV. mezinár. met. sympozia Rájecké Teplice, Žilina : VŠDS, 1996
- [18] Ptáček, L.: Slitiny hořčíku – současný stav vývoje a použití, Metal, 2001
- [19] Sedláček, V. Neželezné kovy a slitiny. Praha : SNTL, 1979
- [20] World-Wide Guide to Equivalent Non-Ferrous Alloys. Ohio (USA) : ASM, 1987
- [21] www.stefanmichna.com/download/progresivni-technologie
- [23] www.stefanmichna.com/opory/technicke-materialy
- [24] Zedník, V. - Šejnoha, R.: Zkoušení kovů, SNTL Praha, 1956
- [25] Kořený, R.: Slévárenství neželezných kovů a slitin, skriptum, VŠB-TU, Ostrava 1971
- [26] Davis, J.R.: Metals Handbook, Desk. Edition, Sekond Edition, ASM International, The Materials Information Society, USA, 1998, 560 - 564
- [27] ASM Speciality Handbook, Magnesium Alloys, ed. Avedesian, ASM International, The Materials Information Society, USA 1999.

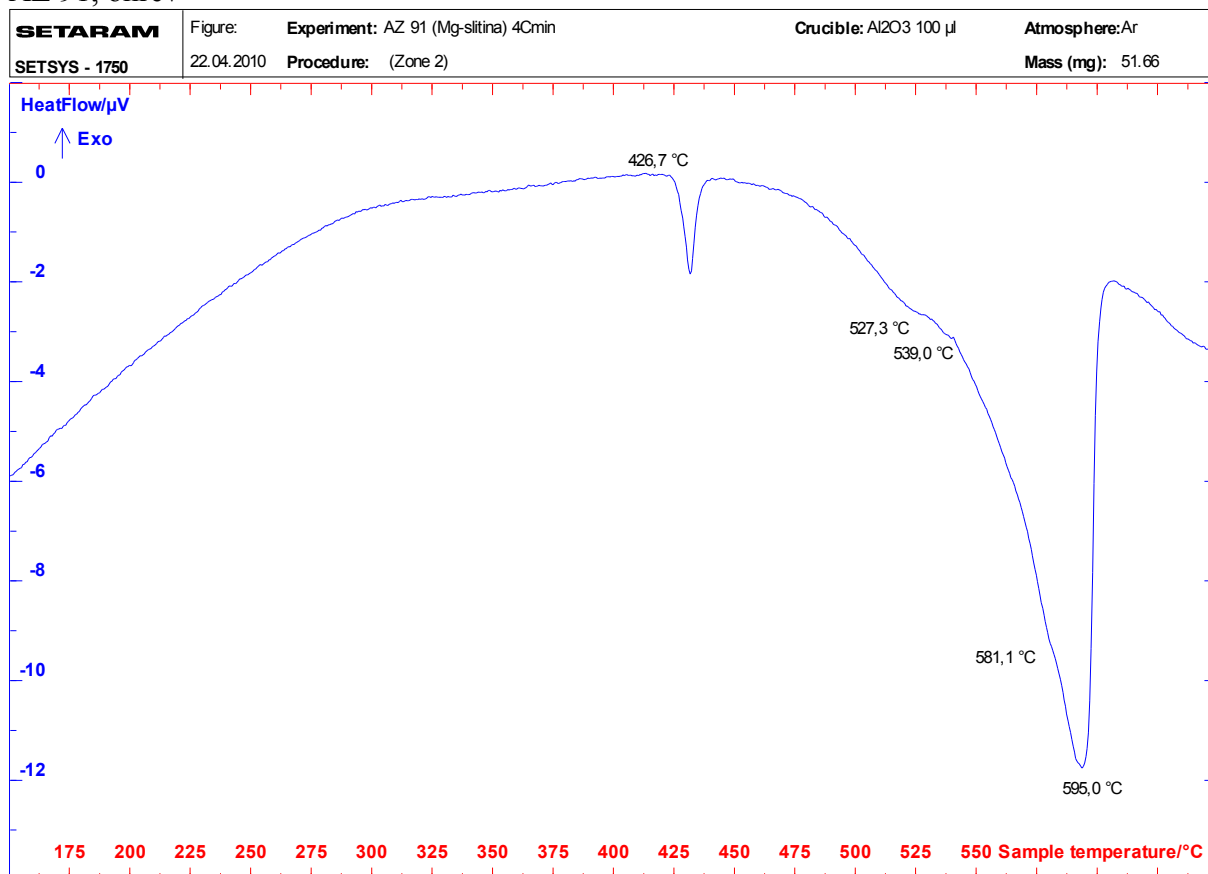
Přílohy

AM 60, ohřev



Příloha č.1.

AZ 91, ohřev



Příloha č.2.

Srovnání AM 60 a AZ 91, ohřev

